

Observación de la Tierra desde el espacio

Una ventana para conocer
el mundo en el que vivimos



Un paseo por el
COSMOS

Observación de la Tierra desde el espacio

Una ventana para conocer
el mundo en el que vivimos



The Doctor y La Comunidad

Redigirización: The Doctor

<http://thedoctorwho1967.blogspot.com.ar/>

<http://el1900.blogspot.com.ar/>

<http://librosrevistasinteresesanexo.blogspot.com.ar/>

<https://labibliotecadeldrmoreau.blogspot.com/>

Imagen de cubierta: Impresión artística del Observatorio Principal GPM (GPM Core Observatory), en órbita alrededor de la Tierra.

Dirección científica de la colección: Manuel Lozano Leyva

© Óscar Augusto Rodríguez Baquero por el texto
© RBA Contenidos Editoriales y Audiovisuales, S.A.U.
© 2017, RBA Coleccionables, S.A.

Realización: EDITEC

Diseño cubierta: Llorenç Martí

Diseño interior: tactilestudio

Infografías: Joan Pejoan

Fotografías: Jesse Allen/Observatorio de la Tierra de la NASA: 127; Campo de Misiles de White Sands/Laboratorio de Física Aplicada: 17; Jacques Descloitres, MODIS Rapid Response Team, NASA/GSFC: 91b; Ed Clark/The LIFE Picture Collection/Getty Images: 41; ESA: 107, 141; ESA/AOES Medialab: 73a, 144; ESA/D. Ducros: 45, 46; ESA/P. Carril: 151b; Estudio de Visualización Científica del Centro Goddard de Vuelos Espaciales de la NASA: 73b; FRONTEX/Eurosur: 93; Britt Griswold/NASA: portada; Laboratorio Nacional de Los Álamos: 27; NASA: 20, 37a, 37b, 67, 83a, 83b, 109, 145, 149, 151a, 152, 154; NASA/Equipo Científico del Landsat: 91a; NASA/GSFC: 101; NASA/GSFC/METI/ERSDAC/JAROS/ASTER Science Team: 119; NASA/JPL: 69; NASA/Robert Simmon/equipo del EO-1: 124; NOAA: 39, 49; Observatorio de la Tierra de la NASA/Joshua Stevens: 92; Observatorio de la Tierra de la NASA/Joshua Stevens/U.S. Geological Survey/U.S. Drought Monitor, Universidad de Nebraska-Lincoln: 103a; Observatorio de la Tierra de la NASA/Joshua Stevens/U.S. Geological Survey: 103b; Robert Simmon/NASA/Centro de Investigación de Woods Hole: 90; USAF: 139.

Reservados todos los derechos. Ninguna parte de esta publicación puede ser reproducida, almacenada o transmitida por ningún medio sin permiso del editor.

ISBN: 978-84-473-8830-1

Depósito legal: B-8280-2017

Impreso y encuadrado en Rodesa, Villatuerta (Navarra)

Impreso en España - *Printed in Spain*

SUMARIO

INTRODUCCIÓN	7	
CAPÍTULO 1	Ciencia y espionaje	13
CAPÍTULO 2	Meteorología	29
CAPÍTULO 3	Climatología	51
CAPÍTULO 4	La huella humana desde el espacio	77
CAPÍTULO 5	Los tesoros de la Tierra	95
CAPÍTULO 6	Desastres naturales	113
CAPÍTULO 7	Sondeando los secretos ocultos de la Tierra	133
LECTURAS RECOMENDADAS	155	
ÍNDICE	157	

INTRODUCCIÓN

El 4 de octubre de 1957, un pequeño ingenio construido por el ser humano, llamado Sputnik, se adentraba en el oscuro vacío del espacio para orbitar en torno a nuestro planeta. Nacía así lo que popularmente conocemos como Era Espacial. Once años después del lanzamiento de aquel satélite, tres seres humanos fueron enviados más allá de la órbita terrestre a bordo de la nave Apolo 8, en el marco de la primera misión circunlunar tripulada de la historia. Los astronautas Frank Borman, William Anders y James Lovell quedaron atónitos cuando, en órbita alrededor de la Luna, vieron sobre el horizonte selenita cómo emergía lentamente una pequeña esfera azulada, de un tamaño aparente comparable al de una canica, suspendida en la mayor de las oscuridades jamás imaginada. La imagen de la Tierra a cuatrocientos mil kilómetros de distancia ofrecía una perspectiva sin precedentes de nuestro planeta. Tres colores predominaban sobre los demás: el azul de los océanos, el blanco de las nubes y el marrón de los continentes. Sobre este último se podían apreciar pequeñas pinceladas de tonalidades verdosas que correspondían a los bosques y las selvas. No se apreciaban fronteras de ningún tipo. La atmósfera, a tales distancias, era totalmente impercep-

tible. En definitiva, aquella imagen describía un planeta de una enorme delicadeza, que flotaba, junto a pequeños puntos de luz, en una oscuridad infinita.

La imagen que la Tierra ofrece desde el espacio provoca un notable impacto en aquellas personas que han tenido el privilegio de traspasar la frontera de nuestra atmósfera. Ya sea en expediciones de minutos, horas o días de duración recorriendo la órbita terrestre o en vuelos de varios días más allá de ella, todos los astronautas regresan de sus respectivas misiones con una visión completamente diferente del planeta que es nuestro hogar. Sus conductas se vuelven más protectoras, cuidadosas y comprometidas con el medio ambiente.

Ese sentimiento, que se fue extendiendo a la comunidad científica y a la sociedad en general en un plazo muy corto de tiempo, combinado con la natural curiosidad humana y la percepción del potencial que ofrecía el espacio, fomentó que, a partir de la década de 1960, varios países comenzasen a poner en órbita ingenios para obtener una imagen lo más completa posible de nuestro planeta y de aquellos fenómenos que tienen lugar en él. Desde su posición privilegiada, estos artefactos pueden tomar imágenes globales, incluyendo aquellas de lugares remotos cuyo acceso desde la superficie terrestre es muy complicado o imposible. Las observaciones realizadas durante largos períodos de tiempo nos ayudan a comprender la evolución que la Tierra y su atmósfera experimentan con el transcurso de los años.

El sucesivo lanzamiento de satélites con instrumentos cada vez más avanzados y precisos nos ha permitido profundizar en el conocimiento de la meteorología y del clima de la Tierra. Los satélites meteorológicos situados en diferentes puntos alrededor del ecuador terrestre, a unos 36 000 km sobre la superficie del planeta, nos proporcionan una visión continua e integral de la actividad atmosférica en diferentes regiones del globo. Gracias a sus observaciones en distintas longitudes de onda, los satélites son capaces de obtener información sobre fenómenos meteorológicos muy diversos. Dicha información facilita sobremanera la elaboración de pronósticos y modelos cada vez más fiables, con una antelación de varios días, algo impensable en los años

previos a la Era Espacial. El seguimiento por satélite de fenómenos extremos, como tormentas y huracanes, contribuye a salvar millones de vidas y a evitar la pérdida de ingentes cantidades de dinero en el sector energético cada año, al proporcionar una información extremadamente útil para prevenir a la población y a las compañías ante tales amenazas.

Otros fenómenos naturales extremos, como terremotos, tsunamis, corrimientos de tierra y riadas, suponen igualmente una amenaza potencial para la vida. De acuerdo con los datos ofrecidos por el Centro para la Investigación sobre la Epidemiología de los Desastres (CRED, por sus siglas en inglés), perteneciente a la Universidad Católica de Lovaina (Bruselas), a lo largo del año 2015 se produjeron 346 catástrofes naturales mundiales, que se tradujeron en la pérdida de 22 773 vidas humanas, cuyos efectos, además, se extendieron a casi 100 millones de personas, provocando asimismo pérdidas económicas por un valor superior a los 66 000 millones de dólares. La utilización de satélites para el seguimiento de determinadas regiones del globo susceptibles de ser golpeadas por estas catástrofes está contribuyendo de manera significativa a la implementación de protocolos de seguridad y, con ellos, a reducir el número de bajas humanas cuando estos fenómenos tienen lugar.

Esa tecnología también ha tenido una aplicación militar. Durante los años que siguieron al lanzamiento del Sputnik 1 en 1957, y en el fervor de la pugna entre los bloques comunista y capitalista de la Guerra Fría, multitud de ingenios dotados de cámaras fueron puestos en órbita con el propósito de realizar misiones de reconocimiento. Esta práctica ha continuado desde la caída del Muro de Berlín en 1989, y ha vivido una intensificación en respuesta al surgimiento de las nuevas amenazas internacionales, con el lanzamiento de vehículos muy sofisticados cuyas prestaciones permiten realizar operaciones que el ciudadano de a pie enmarcaría en las fronteras de la ciencia ficción.

Por otra parte, las observaciones por satélite realizadas a lo largo de extensos períodos de tiempo nos han permitido adquirir conciencia de que la actividad humana influye en determinados fenómenos que, a medio y largo plazo, suponen una grave ame-

naza para la vida en la Tierra. Así, se sabe que el progresivo aumento de las emisiones de dióxido de carbono procedentes tanto de la quema de combustibles fósiles como de la tala y quema indiscriminada de bosques es el principal causante del llamado efecto invernadero. El dióxido de carbono impide que parte de la radiación solar que recibe la Tierra sea reflejada al espacio. En consecuencia, la temperatura global del planeta experimenta un aumento progresivo, cuyos efectos estamos tan solo comenzando a padecer, los cuales se traducen, entre otras cosas, en sequías e inundaciones extremas, y en migraciones humanas ante la consecuente escasez de recursos, todo ello en combinación con fenómenos meteorológicos que describen patrones anormales, cuyo comportamiento la comunidad científica no puede pronosticar por el momento. Las observaciones realizadas por diversas sondas espaciales enviadas tanto a la órbita como a la superficie de Venus, planeta similar en dimensiones a la Tierra, nos demuestran hasta dónde pueden llegar las consecuencias de un efecto invernadero descontrolado. Aquel planeta, que una vez pudo haber sido un paraíso para la vida, es ahora un infierno, con presiones atmosféricas cien veces mayores que la terrestre, y con una temperatura media que se sitúa en torno a los 460 °C.

Otro ejemplo del efecto nocivo de la actividad humana en la atmósfera terrestre es la destrucción de la capa de ozono, degradada especialmente en el polo sur y en latitudes medias del hemisferio sur terrestre por las emisiones de compuestos que contienen cloro, bromo y flúor (halocarbonos). El seguimiento realizado por satélite de los niveles de ozono en la atmósfera terrestre, combinados con estudios de campo, fueron esenciales para la puesta en marcha en 1987 del Protocolo de Montreal, y su posterior implementación en la Cumbre de Kigali en 2016, cuyo objetivo es la introducción de cambios en las legislaciones internacionales que redunden en la eliminación progresiva de elementos destructores del ozono.

Fenómenos como la deforestación, ya sea por causas naturales o artificiales (acción humana), también son observables fácilmente desde el espacio. Los satélites han jugado un papel esencial en el seguimiento de la pérdida de masa forestal a nivel planetario

(con especial incidencia en regiones como la Amazonía), de los patrones asociados a la misma y de sus consecuencias en el ecosistema, a nivel tanto regional como global, entre ellas el aumento del dióxido de carbono en la atmósfera, que contribuye, como se ha dicho, a la intensificación del efecto invernadero.

La desertificación es otro de los fenómenos, inducidos tanto por procesos naturales como artificiales, que afecta a extensas regiones del planeta, y en cuyo seguimiento los satélites juegan un rol igualmente destacado. Los datos obtenidos gracias a estos ingenios han sido decisivos en la toma de medidas contra el avance de la desertificación, adoptadas en convenciones internacionales para la lucha contra este fenómeno, como la celebrada por Naciones Unidas, surgida a raíz de la Cumbre de Río de Janeiro en 1992.

Las observaciones por satélite han sido asimismo de gran ayuda en el ámbito de la agricultura, proporcionando una información de gran valor para localizar regiones fértiles y pronosticar el crecimiento de cultivos, así como para alertar sobre posibles períodos de carestía y sequías. En este sentido, se ha creado una red de alerta temprana que emplea los datos obtenidos por satélite en combinación con aquellos recogidos en tierra, establecida inicialmente en la región del África subsahariana, para extenderse posteriormente a otras del planeta sensibles a estos fenómenos. Al igual que en la agricultura, los datos por satélite benefician a otros ámbitos ligados a los recursos terrestres como el agua, contribuyendo a un mejor conocimiento y gestión de este preciado elemento, cuyo valor pasa inadvertido con demasiada frecuencia para la sociedad.

La observación de la Tierra nos permite, del mismo modo, conocer las características físicas de nuestro planeta. Gracias a instrumentos como altímetros láser de gran precisión, magnetómetros, radares de apertura sintética, espectrómetros y gravímetros, podemos conocer la morfología de la Tierra (lo que lleva, entre otras cosas, una implementación de la cartografía), su campo magnético, los materiales que se sitúan tanto en su superficie como bajo ella, los elementos que constituyen nuestra atmósfera y el campo gravitatorio generado por nuestro planeta.

Además, los datos ofrecidos por los satélites contribuyen a profundizar en el conocimiento de la estructura interna de la Tierra, y en fenómenos como la convección del manto terrestre y los procesos de regeneración de la corteza.

Muchas otras áreas de estudio, entre ellas la arqueología, se han visto notablemente beneficiadas por el lanzamiento de satélites para observación de la Tierra. Gracias a las fotografías en el rango de lo visible, y en longitudes de onda del infrarrojo y del ultravioleta, y de los datos obtenidos a partir de radares desde la órbita terrestre, se han podido localizar los vestigios de antiguas ciudades de las que, hasta entonces, solo existían pobres referencias en testimonios escritos hace miles de años. Los satélites están contribuyendo a reconstruir la historia de las civilizaciones con una efectividad sin precedentes.

Apenas han transcurrido cincuenta años desde que comenzamos a observar la Tierra de manera sistemática desde el espacio. Con el transcurso de los años, los avances tecnológicos están contribuyendo a profundizar cada vez más en los misteriosos y complejos mecanismos que hacen de nuestro planeta un lugar rebosante de vida. Del mismo modo, esa tecnología nos está permitiendo conocer cuáles son las amenazas que nos acechan. Poseyendo los medios para identificarlas, de todos y de cada uno de nosotros depende reaccionar ante ellas de manera efectiva y rápida, antes de que sea demasiado tarde.

CAPÍTULO 1

Ciencia y espionaje

Al finalizar la Segunda Guerra Mundial, los cohetes capturados a los alemanes permitieron obtener las primeras imágenes de la Tierra desde grandes altitudes. A partir de 1957, la humanidad tuvo acceso a un balcón con inmejorables vistas para contemplar nuestro planeta: el espacio.

El desarrollo tecnológico ha sido, es y seguirá siendo en el futuro un factor clave, aunque no definitivo, en las contiendas bélicas. Durante la primera mitad de los años cuarenta del pasado siglo, el régimen nazi desarrolló una serie de sofisticados cohetes con los que intentó sembrar el terror en aquellas potencias que se oponían a sus políticas anexionistas, racistas y de opresión. Uno de ellos, llamado originalmente Aggregat 4 (Conjunto 4, o A-4) y que más tarde fue rebautizado con el nombre de Vergeltungswaffe 2 (Arma de la Venganza 2), más conocida por su abreviatura V2, iniciaría una transición tras la Segunda Guerra Mundial, pasando de ser un artefacto generador de tinieblas a convertirse en un ingenio que iluminaría el camino hacia la exploración del espacio exterior.

En el año 1945, estadounidenses y soviéticos pusieron en marcha sendas operaciones militares con el propósito de capturar a científicos e ingenieros alemanes e incautar algunos ingenios, entre ellos los cohetes V2. Al finalizar tales operaciones, los estadounidenses fijaron su base de experimentación en el White Sands Proving Ground (hoy White Sands Missile Range, o zona de lanzamiento de misiles de White Sands), un enclave militar situado en

el estado de Nuevo México, lugar desértico y poco habitado cuyas características lo convertían en un excelente campo de pruebas para el lanzamiento de los cohetes V2 capturados. Por su parte, los soviéticos establecieron su centro de operaciones en un lugar similar, situado en las estepas de Kapustin Yar (conocido hoy como Známensk), cerca de Volgogrado (entonces llamada Stalingrado). La operación militar estadounidense se saldó con la incautación de varios V2 completos y numerosas piezas a partir de las cuales podrían ensamblarse nuevos cohetes. Estos materiales comenzaron a ser trasladados en julio de 1945 a White Sands junto con una veintena de científicos e ingenieros alemanes, en el marco del denominado Proyecto Hermes, que tenía como objetivo trabajar en la puesta en marcha de un programa de experimentación que perseguía cinco propósitos fundamentales: ganar experiencia en el manejo y lanzamiento de grandes misiles, suministrar vehículos para la realización de experimentos directamente relacionados con el diseño de nuevos misiles, suministrar vehículos para la realización de pruebas de componentes para futuros misiles, obtener datos balísticos y suministrar vehículos para proyectos de investigación de las altas capas de la atmósfera terrestre. Aunque tales objetivos eran mayoritariamente militares, los responsables del Hermes no tardaron en ser conscientes del enorme potencial científico de estos vehículos. Precisamente, el 16 de enero de 1946, alrededor de 50 científicos e ingenieros procedentes de más de una decena de organizaciones se reunieron en el Laboratorio Naval de Investigación (NRL, por sus siglas en inglés) en Washington DC, un encuentro que culminó con la creación del llamado Panel V2 de Investigación de la Alta Atmósfera.

En total, 67 cohetes V2 fueron montados y lanzados en White Sands entre los años 1946 y 1952. A finales de la década de 1940, algunos V2 fueron modificados con la incorporación de un pequeño vector llamado WAC Corporal, convirtiéndose así en el primer cohete multietapa lanzado desde el hemisferio occidental.

El 24 de octubre de 1946, durante el lanzamiento número 13 de un cohete V2, se obtuvo la primera imagen de la Tierra desde el umbral del espacio exterior (véase la fotografía de la página contigua). A una altitud próxima a los 105 km sobre la superficie



Primera imagen de la Tierra tomada desde el espacio por una cámara a bordo de un cohete V2.

cie terrestre, una cámara de 35 mm acoplada en el morro del cohete en sustitución de su cabeza explosiva capturó imágenes a intervalos de un segundo y medio en las que, a pesar de su escasa resolución y abundante grano, se apreciaba claramente la curvatura de la Tierra, la oscuridad del espacio y las formaciones nubosas situadas sobre las tierras desérticas del estado de Nuevo México. El cohete, al agotar su combustible, emprendió su caída libre hacia tierra, impactando a gran velocidad contra la superficie. Aunque tanto él como la cámara quedaron reducidos a un amasijo de hierros, la película, alojada en un contenedor de acero, sobrevivió al choque. Otros lanzamientos incorporaron igualmente cámaras para la realización de fotografías a gran altitud, destacando el efectuado el 26 de julio de 1948, cuyas tomas permitieron la composición de una panorámica en la que se apreciaba un área superior a un millón de km², abarcando el estado de Nuevo México, extensiones de México y el golfo de California.

En 1950, mientras reunía las fotografías tomadas en otro lanzamiento del cohete V2, el científico Otto Berg halló una secuencia de imágenes en las que se apreciaba una gran tormenta tropical situada sobre Brownsville (Texas). Berg conformó un mosaico con aquellas fotografías, descubriendo el potencial que las cámaras situadas en el espacio tenían en el seguimiento de fenómenos meteorológicos. Ese potencial no pasó inadvertido para la comunidad científica internacional, que comenzó a mostrar un profundo interés en la puesta en marcha de programas de investigación mediante el uso de cohetes sonda para el estudio de las capas altas de la atmósfera terrestre. En 1952, dicho interés dio como resultado que el Consejo de Uniones Científicas (hoy conocido como Consejo Internacional para la Ciencia) declarara 1957 Año Geofísico Internacional (IGY, por sus siglas en inglés), cuyo propósito era satisfacer el interés creciente por expandir los estudios relacionados con la Tierra y su entorno planetario. En octubre de 1954, el Comité del IGY adoptó una resolución mediante la cual se incentivaba a los países participantes en aquella efeméride a lanzar satélites artificiales para confeccionar un mapa global de la Tierra.

LA LLEGADA DE LA ERA ESPACIAL

El 4 de octubre de 1957, la Unión Soviética inauguró lo que popularmente se conoce como *Era Espacial* con el lanzamiento del Sputnik 1, el primer satélite artificial de la historia. Aquel ingenio estaba integrado por una esfera de aluminio de unos 58 cm de diámetro, dotada de cuatro antenas de casi tres metros de longitud. Provisto de rudimentarios instrumentos alojados en un compartimento hermético, el satélite debía obtener datos relacionados con la densidad de las capas superiores de la atmósfera, con la propagación de las señales de radio en la ionosfera y con la temperatura en el interior y en la superficie de la esfera. Entre sus instrumentos figuraban unos transmisores que operaban en los 20,005 y 40,002 MHz (en una longitud de onda de 15 y 7,5 m, aproximadamente). El satélite debía realizar sus transmisiones de forma periódica, con una duración de 0,3 s.

El 3 de noviembre de aquel mismo año, la Unión Soviética volvió a lanzar un nuevo vehículo al espacio. Se trataba del Sputnik 2, un satélite más sofisticado que su predecesor, el cual transportaba al primer ser vivo a la órbita terrestre, la perra Laika. La respuesta de Estados Unidos a las proezas soviéticas llegó con el lanzamiento del Explorer 1 el 1 de febrero de 1958, un aparato dotado de algunos instrumentos científicos que, entre otras cosas, le permitieron detectar la presencia de unos cinturones magnéticos en torno a la Tierra, conocidos como *cinturones de Van Allen* en honor al científico que determinó su existencia, James Van Allen.

En líneas generales, y a excepción del Explorer 6, que tomó las primeras imágenes de formaciones nubosas desde la órbita, los primeros ingenios lanzados al espacio carecían de equipo fotográfico y disponían únicamente de sensores e instrumentos para realizar mediciones del entorno espacial próximo a la Tierra. No obstante, las cualidades que ofrecía la órbita terrestre para la observación de nuestro planeta, un magnífico balcón con inmejorables vistas en palabras de muchos astronautas, fueron el motivo por el que los primeros ingenios equipados con cámaras fotográficas y de televisión no tardaron en ser lanzados al espacio. Además, el ambiente de tensión que se vivía en el marco

EL PIONERO JAMES ALFRED VAN ALLEN

James Van Allen nació en Mount Pleasant, en el estado de Iowa (Estados Unidos), el 7 de septiembre de 1914. Fue el segundo de los cuatro hijos de Alfred Morris y Alma Olney Van Allen (de ascendencia holandesa). Desde muy joven, James mostró un gran interés por los instrumentos electromecánicos, un interés que se alimentaba gracias a sus lecturas de revistas como *Popular Mechanics* y *Popular Science*. Sus experimentos durante la niñez y juventud con la electricidad le costaron a su madre algún susto. Se graduó *summa cum laude* por la Facultad Metodista de Iowa en 1935, y obtuvo un máster y el doctorado en física por la Universidad de Iowa en 1936 y 1939, respectivamente. Casi toda su vida trabajó en el Departamento de Física y Astronomía de dicha universidad. Entre los años 1940 y 1942, trabajó en el Instituto Carnegie de Washington y en el Laboratorio de Física Aplicada de la Universidad Johns Hopkins con financiación del Consejo Nacional de Investigación de Defensa, contribuyendo al desarrollo de detonadores que incrementaban la efectividad del fuego antiaéreo.

Trayectoria científica tras la guerra

A partir del año 1945, Van Allen desarrolló equipos y dispositivos para la investigación científica de las capas altas de la atmósfera y la exploración de regiones próximas al espacio, y participó en experimentos de gran altitud realizados con los cohetes V2 capturados a los nazis tras la Segunda Guerra Mundial. Trabajó asimismo en iniciativas de sondeo atmosférico desarrolladas con otros lanzadores, como el WAC Corporal y el Aerobee. En 1950 celebró una cena en su casa durante la cual se expusieron las primeras líneas de trabajo de cara a la celebración del Año Geofísico Internacional (IGY), cuyo desarrollo tuvo lugar entre 1957 y 1958. Dos de los logros más destacados realizados en el marco del IGY fueron el descubrimiento de los cinturones de radiación que rodean la Tierra (llamados, en su honor, cinturones de Van Allen) y la determinación de la morfología de nuestro planeta, más próxima a la de una pera que a la de una esfera, gracias a diversos instrumentos científicos que él mismo diseñó. Sus trabajos dieron como resultado el nacimiento de una nueva área de estudio científico: la física magnetosférica. Tras el IGY, Van Allen trabajó en más de 25 misiones espaciales como investigador principal, prestando sus servicios en la Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (NASA),

la Academia Nacional de Ciencias y la Unión Geofísica Estadounidense (AGU). Fue, asimismo, un defensor de la puesta en marcha de misiones espaciales de bajo coste. Van Allen falleció el 9 de agosto de 2006, como consecuencia de un fallo cardíaco.



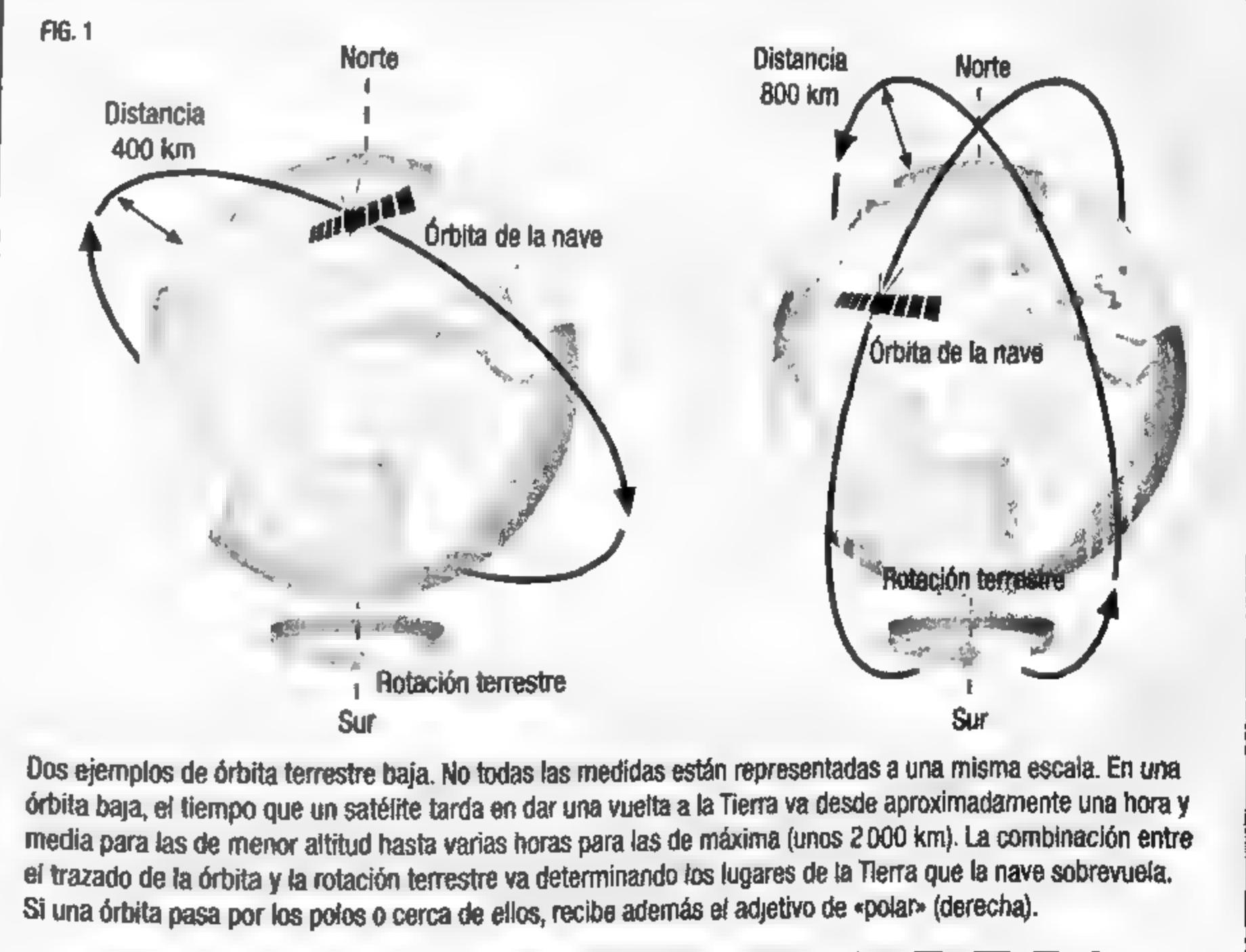
James Van Allen durante un acto celebrado en el marco del programa Pioneer de la NASA.

de la Guerra Fría aceleró los planes para la puesta en órbita de satélites y plataformas provistos de equipamientos destinados a la captación de imágenes de la Tierra en alta resolución.

DIFERENTES ÓRBITAS PARA DIFERENTES SATÉLITES

Tras el lanzamiento del Sputnik 1 en 1957 y en un plazo de tiempo muy corto, el cielo comenzó a poblararse de satélites cada vez más sofisticados y con funciones muy diversas. Existen cinco tipos de órbitas principales en las que colocar un ingenio espacial, dependiendo de la función que este vaya a desempeñar.

La órbita terrestre baja, o LEO por sus siglas en inglés, discurre en torno a la Tierra hasta altitudes próximas a los 2 000 km (figura 1). Sus períodos oscilan entre los 90 minutos (para las al-



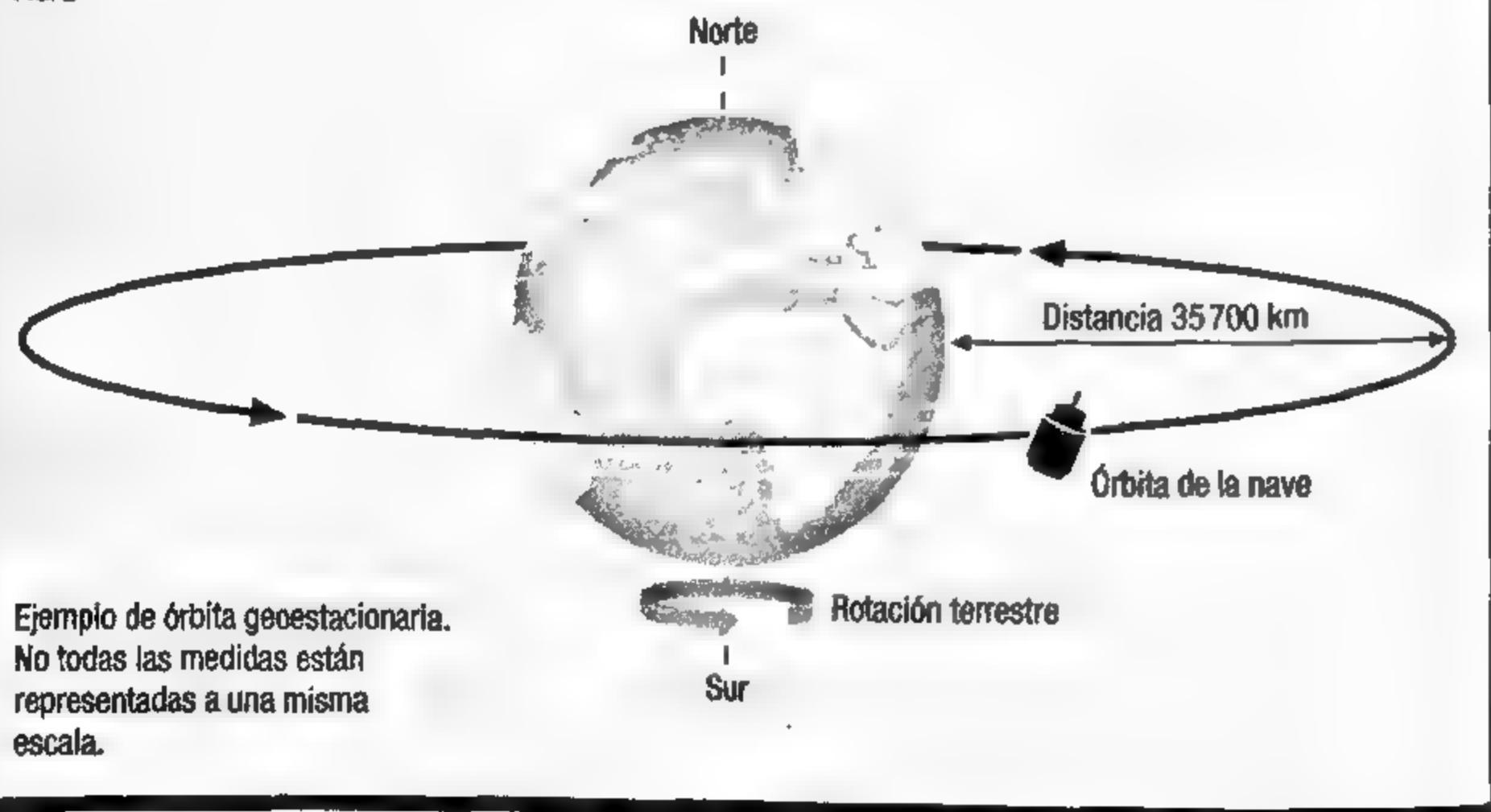
Dos ejemplos de órbita terrestre baja. No todas las medidas están representadas a una misma escala. En una órbita baja, el tiempo que un satélite tarda en dar una vuelta a la Tierra va desde aproximadamente una hora y media para las de menor altitud hasta varias horas para las de máxima (unos 2 000 km). La combinación entre el trazado de la órbita y la rotación terrestre va determinando los lugares de la Tierra que la nave sobrevuela. Si una órbita pasa por los polos o cerca de ellos, recibe además el adjetivo de «polar» (derecha).

titudes más bajas) y varias horas (para aquellas más altas, hasta llegar a los 2 000 km). Esta órbita es utilizada principalmente por naves espaciales tripuladas, ciertos satélites de comunicaciones y meteorológicos e ingenios militares.

La órbita geoestacionaria, o GEO por sus siglas en inglés, (figura 2) es una órbita circular situada a unos 35 700 km de altura (5,6 radios terrestres, aproximadamente). Se extiende hasta alcanzar casi la décima parte de la distancia entre la Tierra y la Luna, y su periodo es de casi 24 horas, coincidente con el de la rotación terrestre. Para un observador en la superficie, un satélite en esa órbita se muestra estático. Un satélite situado a 35 700 km sobre el ecuador del planeta tiene un campo de visión del 80% del disco terrestre. Esta órbita suele ser utilizada principalmente por satélites meteorológicos, militares y de comunicaciones, y es un subconjunto de las llamadas órbitas geosincrónicas (GSO).

La órbita Molniya (figura 3) debe su denominación a la serie de satélites soviéticos Molniya, que operaban sobre todo en esta órbita, marcadamente elíptica, de 40 000 km en su punto más distante (o apogeo) y 500 km en su punto más cercano (o perigeo). Los satélites que navegan en estas órbitas tienen un periodo de

FIG. 2



12 horas, desplazándose muy despacio en puntos próximos al apogeo, y muy deprisa en las proximidades del perigeo, motivo por el cual permanecen 11 de las 12 horas de su periodo sobre un mismo hemisferio.

Entre las órbitas LEO y GEO, la órbita media (figura 4), inclinada o sobre el ecuador, se sitúa a unos 20 000 km sobre la superficie, con un periodo de 12 horas. También es utilizada por satélites civiles y militares, como los de navegación.

FIG. 3

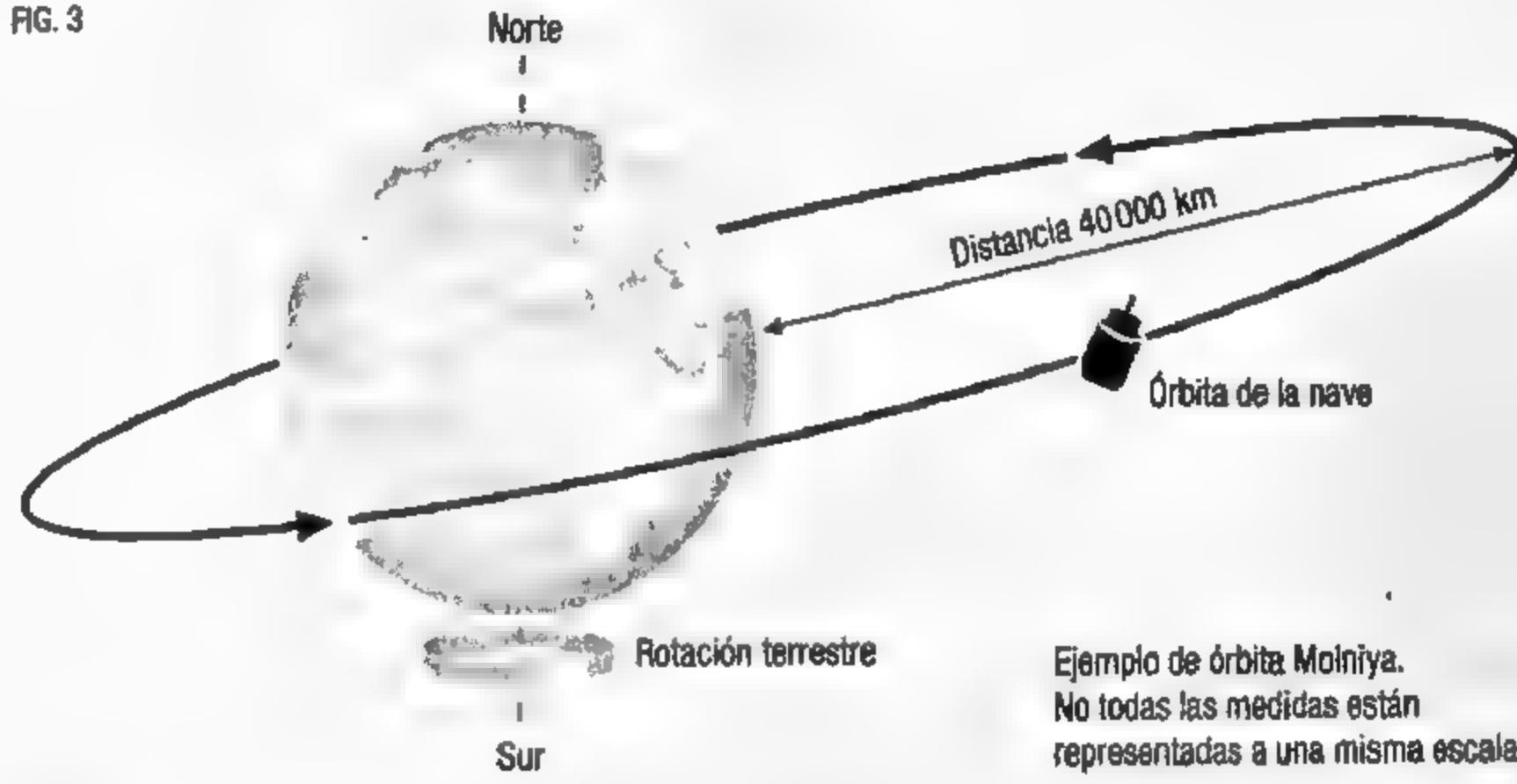
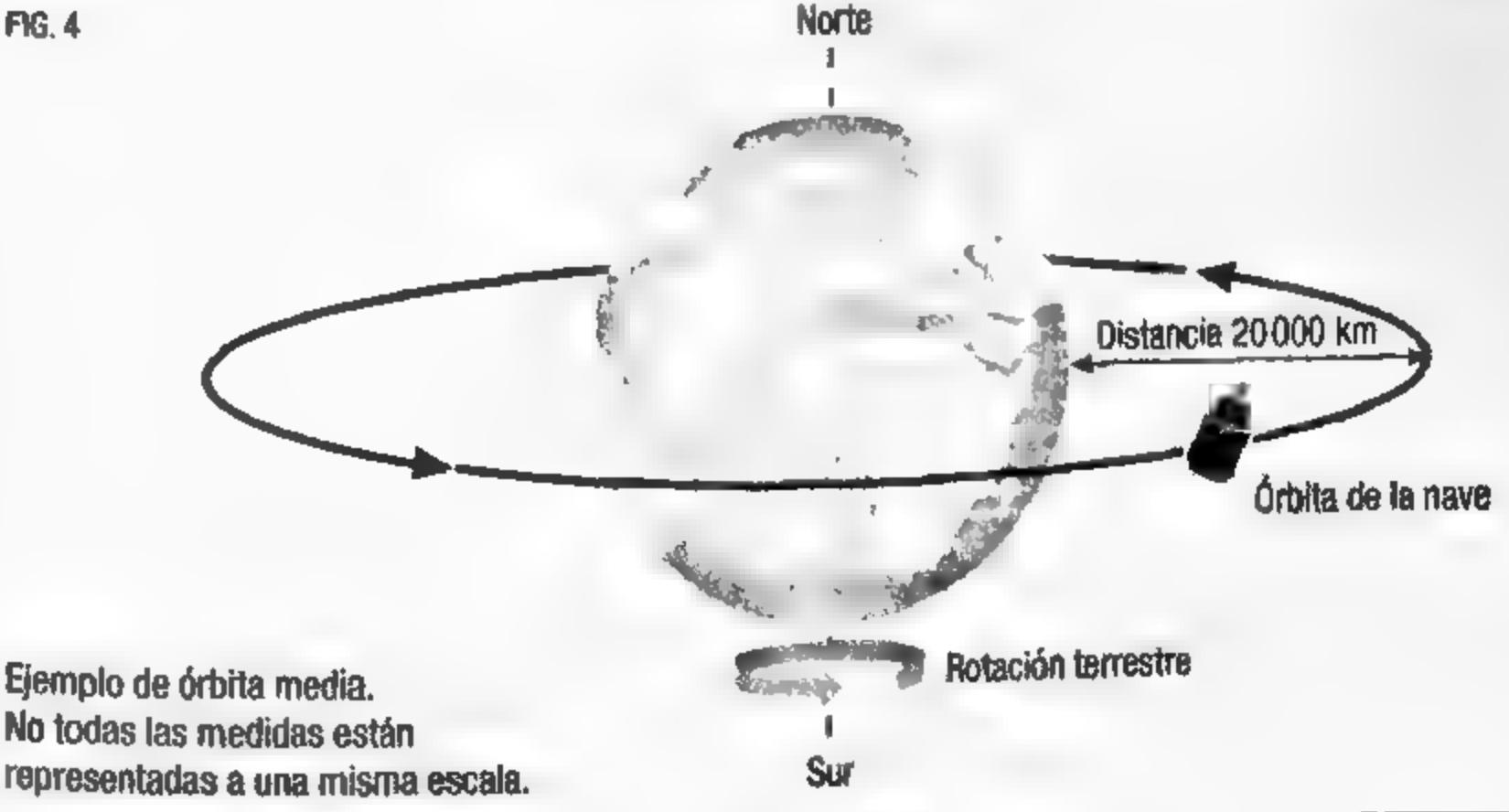


FIG. 4



La órbita de gran altitud se encuentra situada entre las órbitas GEO y lunar. Se trata de un espacio muy poco poblado de satélites, con usos variados, aunque principalmente militares y científicos. En este tipo de órbitas se situaban, entre otros, los satélites de la serie Vela, destinados a la detección de explosiones nucleares.

MIRADAS INDISCRETAS DESDE LAS ALTURAS

A lo largo del año 1959, comenzaron a ser puestos en órbita los primeros satélites destinados al reconocimiento fotográfico del territorio enemigo. Hasta entonces, esta tarea era desempeñada únicamente por globos y por aeronaves diseñadas para volar a grandes altitudes, destacando el U-2 estadounidense, un avión de reconocimiento que se hizo muy popular a partir del 1 de mayo de 1960, fecha en que uno de ellos fue derribado mientras sobrevolaba el espacio aéreo soviético, sobre la región de Sverdlovsk. Este acontecimiento aceleró los planes de desarrollo del programa Corona, nombre en clave de una iniciativa equipada con cámaras Keyhole (KH) y puesta en marcha por la Oficina de Dirección Científica y Tecnológica de la Agencia Central de Inteligencia de Estados Unidos (CIA), con la colaboración de las Fuerzas Aéreas (USAF). El objetivo del programa Corona era la puesta en órbita de satélites de reconocimiento estratégico, y su inicio tuvo lugar el 28 de febrero de 1959 con el lanzamiento del Discoverer 1, un ingenio que no llegó a cumplir su cometido experimental al perderse todo contacto con él durante su entrada en órbita. Este tipo de satélites tendría la misión de tomar fotografías y posteriormente retornar la película empleada a la Tierra, a bordo de una cápsula, para su posterior análisis. Las misiones de los satélites Discoverer (nombre tapadera del programa Corona) presentaron una infinidad de dificultades, entre lanzamientos truncados y liberaciones fallidas de las cápsulas con las películas fotográficas. Los objetivos no fueron alcanzados completamente hasta la misión del Discoverer 14, lanzada el 18 de agosto de 1960. La cápsula liberada por este satélite reen-

tró en la atmósfera terrestre, descendiendo en paracaídas sobre el océano Atlántico. Un avión C-119 logró capturarla con éxito tras dos intentos fallidos, antes de que alcanzara el mar. Una vez en tierra, los responsables de la misión comenzaron la tarea de revelar los más de 910 m de película, que contenían fotografías del territorio soviético que abarcaban más de 4 200 000 km² de superficie.

La técnica de retorno y recuperación de película fotográfica demostró ser harto complicada y propensa a los fracasos, por lo que en el futuro este método fue sustituido por otro más seguro y efectivo. Posteriores satélites de la serie Keyhole comenzaron a utilizar tecnología digital para la toma de imágenes y su posterior transmisión a la Tierra vía telemétrica. Estados Unidos empezó a emplear esta técnica con el satélite KH-11, provisto de escáneres multiespectrales capaces de observar porciones visibles e invisibles al ojo humano del espectro. Entre sus prestaciones atribuidas figuraba la capacidad de fotografiar eventos que habían tenido lugar en el «pasado», mediante la observación del calor residual procedente del lanzamiento de misiles y el desplazamiento de tropas. La opinión pública tuvo conocimiento de este satélite y su tecnología al destaparse un caso de contrainspionaje protagonizado por un entonces joven agente de la CIA llamado William Kampiles, que vendió a la inteligencia soviética uno de sus manuales de operaciones.

La Unión Soviética también desarrolló sus programas de reconocimiento fotográfico y de inteligencia durante los años de la Guerra Fría. Bajo la denominación Kosmos, la URSS enmascaró multitud de misiones clasificadas de ámbito militar. De hecho, se calcula que durante aquel periodo, hasta un 70% de los sistemas espaciales soviéticos se enmarcaban en dicho ámbito.

El primer lanzamiento exitoso de un ingenio soviético destinado al reconocimiento fotográfico data del 26 de abril de 1962, fecha en que partió al espacio el satélite Kosmos 4. Se trataba, en realidad, de una versión modificada de la nave Vostok que

Ciertamente, una de las cosas más apasionantes sobre la vida humana es el reconocimiento de que vivimos en lo que, en la práctica, es un universo sin límites.

JAMES ALFRED VAN ALLEN

puso en órbita al primer ser humano, el cosmonauta soviético Yuri Gagarin, el 12 de abril del año anterior, y se llamaba Zenit 2. Tres días después, la nave, dotada de un sistema de protección térmica al igual que la Vostok, regresó del espacio y fue recuperada. Este tipo de vehículos estaban provistos de cámaras y rollos fotográficos. Una vez finalizada su misión, los rollos eran recuperados para su posterior revelado. Tras varios lanzamientos de prueba, la primera misión operativa, Kosmos 12, despegó el 22 de diciembre. La nave fue recuperada ocho días después.

La segunda generación de satélites soviéticos de reconocimiento fotográfico fue inaugurada con el lanzamiento del Kosmos 22 el 16 de noviembre de 1963, una versión mejorada (Zenit 4) que contaba con instrumentación de alta resolución. Su vida útil, al igual que la de sus predecesores, se situaba en torno a los ocho días, aunque el Kosmos 22 regresó dos días antes.

La tercera generación (Zenit 4M) supuso un cambio en la morfología del satélite, ya que añadió un módulo delantero que le permitía maniobrar. El primer satélite de esta tercera generación fue el Kosmos 251, lanzado el 31 de octubre de 1968.

La cuarta generación (Yantar 2K) fue encabezada por el Kosmos 758, lanzado el 5 de septiembre de 1975. Su diseño era totalmente distinto al de sus antecesores, con un módulo de servicio cónico y tres cápsulas de recuperación.

La quinta generación (Yantar 4KS), que entró en funcionamiento entre los años 1982 y 1984, eliminó la necesidad de retornar la película fotográfica a la Tierra, dado que la toma de imágenes se hacía mediante tecnología digital, y los datos eran enviados mediante telemetría utilizando satélites de comunicaciones emplazados en órbita geoestacionaria o Molniya. A esta serie pertenecieron los vehículos Kosmos 1426, Kosmos 1552 y Kosmos 1643, entre otros posteriores. Los satélites de esta quinta generación tenían la particularidad de que podían ser desactivados tras el lanzamiento, y entrar en funcionamiento varios días después. En años posteriores, se introducirían nuevas generaciones de satélites espía, hasta la actualidad.

Asimismo, la URSS empleó sus estaciones de la serie Salyut en la realización de tareas de reconocimiento fotográfico. Estas

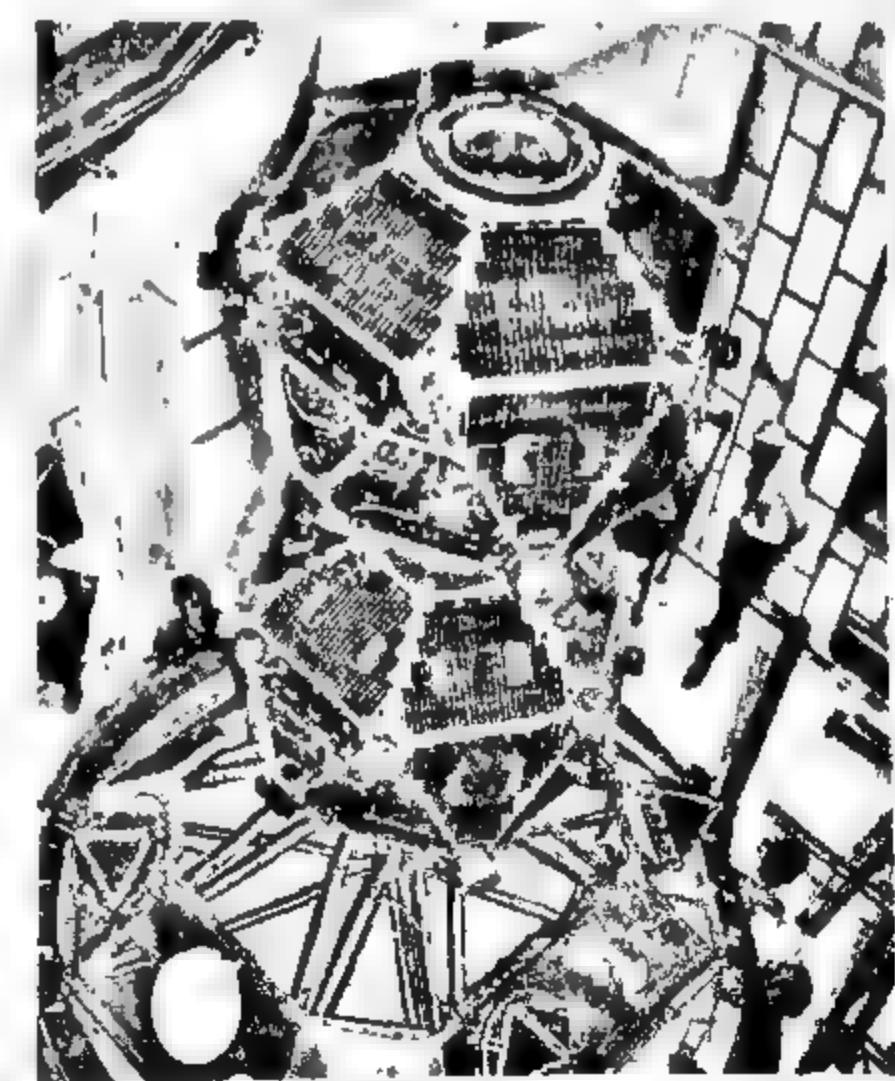
EL INCIDENTE VELA

Los satélites de la serie Vela fueron lanzados por Estados Unidos entre los años 1963 y 1970 con el propósito de detectar detonaciones nucleares desde la órbita terrestre. Precisamente, 1963 fue el año en que entró en vigor el Tratado de Prohibición de Pruebas Nucleares firmado con el respaldo de la Organización de Naciones Unidas (ONU). Estos ingenios, que orbitaban la Tierra a una altitud máxima de 107 800 km, iban provistos de diversos instrumentos que les permitían detectar las numerosas firmas vinculadas a tales detonaciones en la atmósfera terrestre, entre ellos sensores de rayos gamma, rayos X y un dispositivo capaz de advertir los dos destellos de luz asociados a cada detonación: un primer *flash* muy corto pero intenso, seguido de otro, más tenue pero de mayor duración. Los sensores de estos satélites eran tan precisos que podían detectar este tipo de detonaciones no solo en la Tierra, sino también en el espacio cercano, e incluso en los planetas Venus y Marte.

¿Un evento espacial o una detonación nuclear?

Durante las primeras horas del 22 de septiembre de 1979, uno de los satélites Vela detectó lo que parecían evidencias de una detonación nuclear. La señal registrada procedía de un área con un diámetro próximo a los 5 000 km que abarcaba las regiones meridionales de los océanos Atlántico e Índico, África y parte de la Antártida. Las investigaciones realizadas con posterioridad a la detección no evidenciaron la existencia de movimientos sísmicos asociados a la presunta detonación, ni tampoco residuos radiactivos. El Panel Presidencial creado *ad hoc* para investigar el evento concluyó que la detección fue causada probablemente por el impacto de un meteorito (una roca de origen espacial, con un tamaño inferior a 10 m de envergadura) contra un satélite, siendo los residuos resultantes los que habrían ocasionado la falsa detección. Sin embargo, los análisis de los mismos datos realizados por la Agencia de Inteligencia de Defensa (DIA) y por los laboratorios nacionales de Sandia y de Los Álamos, dieron como resultado que se trató, en efecto, de la detección de una detonación nuclear. Tal conclusión se basaba en diversas evidencias, entre ellas la presencia de yodo-131 (un isótopo del yodo producto de la fisión) en la glándula tiroides de un nutrido grupo de ovejas ubicadas en Melbourne (Australia), y en una perturbación itinerante en las altas capas de la atmósfera detectada por el Observatorio Ionosférico de Arecibo, en Puerto Rico.

Dos satélites Vela durante los preparativos para su lanzamiento.



se efectuaron con especial intensidad a bordo de las Salyut 3 y Salyut 5, las cuales contaban con sendas cámaras fotográficas con una longitud focal de 6,3 m que se emplearon para fotografiar territorios sensibles en los momentos en que las estaciones se encontraban próximas a su perigeo.

El espacio es duro, pero vale la pena. Perseveraremos y avanzaremos juntos.

RICHARD BRANSON

Desde el año 1962, todos los lanzamientos estadounidenses relacionados con la inteligencia y el reconocimiento trascendieron al ámbito del alto secreto, por lo que, a partir de entonces, dejaron de ser conocidas

las características y prestaciones de aquellos satélites destinados a tales funciones. No obstante, con el transcurso de los años y la entrada en vigor en Estados Unidos del Acta de Libertad Informativa (FOIA, por sus siglas en inglés), algunos detalles han trascendido a la opinión pública, y algunos programas, los más antiguos, han sido desclasificados. El lanzamiento de aparatos destinados a la observación de la Tierra con fines militares y de inteligencia no cesó con el final de la Guerra Fría en 1989, sino que se ha prolongado hasta nuestros días, con satélites cada vez más sofisticados y misiones de cada vez mayor duración, algunas de las cuales fueron lanzadas mediante vehículos civiles como el Transbordador Espacial de la NASA.

La USAF cuenta con su propio programa de transbordadores espaciales desde el año 2011. Bautizados con la denominación técnica de X-37B, estos vehículos no tripulados tienen un tamaño bastante reducido (una cuarta parte de las dimensiones de los transbordadores de la NASA), y formaban originalmente parte de un proyecto conjunto de la NASA, la Agencia de Investigación de Proyectos Avanzados de Defensa (DARPA, por sus siglas en inglés) y la compañía aeroespacial Boeing. El proyecto fue transferido a la USAF en el año 2004, la cual cuenta desde 2011 con dos unidades que tienen la capacidad de permanecer más de dos años en órbita terrestre baja, realizando, entre otras, tareas de reconocimiento visual, gracias a la amplitud de su bodega de carga (2,1 por 1,2 m), que permite la instalación de una gran variedad de dispositivos, entre ellos equipos fotográficos.

CAPÍTULO 2

Meteorología

Desde la llegada de los primeros satélites meteorológicos ha sido posible pronosticar la intensidad y los efectos de tormentas y huracanes con días de antelación, salvando así millones de vidas cada año.

Muchos de los aspectos que afectan a la vida cotidiana dependen de la meteorología, y por ese motivo el ser humano ha invertido muchos esfuerzos en comprender y en predecir los fenómenos que esta engloba.

Hasta la década de 1930, los pronósticos meteorológicos se realizaban, entre otras técnicas, con el lanzamiento de *radiosondas*, globos estacionarios elevados hasta determinadas altitudes portando instrumentos de radio con los que se obtenía información sobre el estado de la atmósfera, un método que contaba con importantes limitaciones. Como se explicó en el capítulo anterior, los lanzamientos realizados entre 1946 y 1952 con los cohetes V2 desde White Sands, en Nuevo México, evidenciaron el potencial que el espacio tenía para la observación de fenómenos meteorológicos. En 1954, cuatro años después de que Otto Berg conformara aquel mosaico de fotografías tomadas durante el lanzamiento de un V2 en las que se apreciaba una gran tormenta, el entonces jefe de la División de Servicios Científicos de la Oficina Meteorológica de Estados Unidos, Harry Wexler, publicó un trabajo titulado «La observación meteorológica desde un vehículo satélite».

El lanzamiento de los primeros ingenios artificiales a partir de octubre de 1957 hizo del espacio exterior un entorno accesible desde el que poder desarrollar una amplia variedad de actividades, entre ellas la observación terrestre. Las primeras imágenes obtenidas desde la órbita de nuestro planeta pusieron de manifiesto cuán cambiante es la Tierra, especialmente en lo que a meteorología se refiere, con fenómenos muy diversos, cuyo desarrollo, en ocasiones, puede suponer una amenaza potencial para la vida.

La puesta en órbita de los satélites cambió radicalmente la forma de ver la meteorología. Antes de la Era Espacial, fenómenos como tormentas y huracanes se presentaban sin previo aviso, afectando a grandes extensiones de territorio, provocando multitud de bajas humanas e importantes daños económicos. Hoy en día, los satélites se nos antojan indispensables, dado que los datos que proporcionan permiten a los científicos profundizar en el entendimiento de los mecanismos atmosféricos, lo que redonda en un perfeccionamiento de los modelos meteorológicos y, con ellos, en una mejora y mayor fiabilidad de los pronósticos, los cuales son vitales para alertar a la población ante la proximidad de aquellos fenómenos extremos que pudieran suponer una amenaza potencial.

Aunque los primeros satélites meteorológicos portaban cámaras de televisión, los actuales han sustituido estas por unos instrumentos llamados radiómetros, cuya función es realizar barridos de la Tierra para captar la radiación emitida por el planeta y generar imágenes con la información obtenida. Los radiómetros están integrados por un pequeño telescopio (a veces una antena), un mecanismo de barrido y uno o varios sensores que operan en el rango de la luz visible, la infrarroja y las microondas, con el propósito de generar diferentes tipos de imágenes de los fenómenos meteorológicos que tienen lugar en nuestro planeta.

Muchos de los satélites meteorológicos son lanzados hacia una órbita geoestacionaria, situada en torno a los 35 700 km sobre la superficie terrestre. Estos vehículos son posicionados en el plano ecuatorial del planeta, próximos a la latitud 0°. Distribuidos a lo largo de este plano, cubren diferentes regiones de la Tierra.

Así, los satélites meteorológicos estadounidenses de la NOAA, GOES-East (GOES-Este) y GOES-West (GOES-Oeste), están situados de manera que observan la mayor parte del hemisferio oeste, desde la costa occidental de África hasta el Pacífico Oeste, y regiones árticas y antárticas, mientras que los europeos de la serie Meteosat observan Europa, África, Oriente Medio y parte de América del Sur, e igualmente zonas árticas y antárticas.

LA PREDICCIÓN METEOROLÓGICA NUMÉRICA

Conocido también por sus siglas inglesas NWP, este término engloba a los sistemas que emplean datos meteorológicos para desarrollar modelos físico-matemáticos de la dinámica atmosférica, con el objetivo de pronosticar la evolución de los diferentes fenómenos meteorológicos que tienen lugar a lo largo y ancho del globo terrestre.

En el año 1846, el entonces director del Observatorio de París y Secretario de la Academia Francesa de Ciencias, François Arago, argumentaba que, a pesar de los progresos que pudiera experimentar la ciencia, los observadores nunca serían capaces de realizar pronósticos meteorológicos. Sin embargo, los avances en ciencia y tecnología a lo largo de los años demostraron que Arago se equivocaba. En la actualidad, mediante la NWP, se pueden realizar pronósticos fiables del tiempo con una antelación de hasta diez días, gracias, entre otras cosas, al descubrimiento de los principios matemáticos que regulan el flujo atmosférico y los cambios en la fase del agua, la invención de computadoras y de técnicas numéricas que, si bien no son capaces de resolver este tipo de ecuaciones no lineales, logran producir resultados muy aproximados, y el desarrollo de sistemas de observación que suministran datos sobre el estado inicial de la atmósfera. En referencia a esto último, los satélites en órbita alrededor de la Tierra juegan un papel esencial, dado que la precisión de los datos que proporcionan sobre el estado inicial de la atmósfera constituye la base principal para la elaboración de modelos numéricos de predicción meteorológica.

La NWP ha adquirido una relevancia tan notable que los principales organismos internacionales del sector han creado centros dedicados íntegramente a dicha función. Tal es el caso del Centro Europeo de Predicción Meteorológica a Medio Plazo (ECMWF, por sus siglas en inglés) y de los Centros Nacionales de Predicción Medioambiental de Estados Unidos (NCEP, por sus siglas en inglés).

LOS PRIMEROS METEORÓLOGOS ORBITALES

El 1 de abril de 1960, es decir, dos años y medio después de la puesta en órbita del Sputnik 1, los Estados Unidos lanzaron el primer ingenio de la historia destinado al seguimiento meteorológico. Se trataba del TIROS, siglas, en inglés, de Satélite de Observación Infrarroja por Televisión (véase la fotografía superior de la pág. 37), la primera de una serie de naves desarrolladas en el marco de un proyecto de colaboración entre la NASA, la Administración de Servicios Científicos Medioambientales (ESSA) y la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA). Este vehículo orbitaba la Tierra a 724 km de altitud, con una inclinación de 50° sobre el ecuador terrestre. Los satélites de la serie TIROS estaban diseñados para determinar los continuos cambios en los patrones meteorológicos de nuestro planeta, mediante el envío periódico a tierra de imágenes fijas de televisión. El TIROS 1 fue el satélite que obtuvo la primera imagen de la cubierta nubosa de la Tierra con esta tecnología.

El programa TIROS permitió obtener una cobertura mundial a partir de 1962, y sus datos fueron utilizados por los meteorólogos de todo el mundo. En 1965, el TIROS 9 se convirtió en el primer satélite de su clase en ser colocado en una órbita polar heliosincrónica, esto es, una órbita circular polar, en la que el plano de la misma mantiene una relación constante con la línea Sol-Tierra, de tal modo que un satélite pasa sobre un punto de la Tierra casi a la misma hora cada día. Esto permitió, por primera vez, una cobertura continua de todo el hemisferio terrestre iluminado por el Sol.

SATÉLITES DE LAS SERIES TIROS, ESSA/TDS E ITOS				
Satélite	Fecha de lanzamiento	Período operativo (días)	Peso (kg)	Sistemas
TIROS 1	01/04/1960	78	122,4	TV
TIROS 2	23/11/1960	376	127	TV
TIROS 3	12/07/1961	230	129,3	TV, IR
TIROS 4	08/02/1962	161	129,3	TV, IR
TIROS 5	19/06/1962	321	129,3	TV, IR
TIROS 6	18/09/1962	389	127,4	TV
TIROS 7	19/06/1963	1809	134,7	TV, IR
TIROS 8	21/12/1963	1287	120,2	APT
TIROS 9	22/01/1965	1238	138,3	TV
TIROS 10	02/07/1965	730	127	TV
ESSA 1	03/02/1966	861	138,3	TV
ESSA 2	28/02/1966	1692	131,5	APT
ESSA 3 (TOS-A)	02/10/1966	738	145,1	AVCS
ESSA 4 (TOS-B)	26/01/1967	465	131,5	APT
ESSA 5 (TOS-C)	20/04/1967	1034	145,1	AVCS
ESSA 6 (TOS-D)	10/11/1967	763	131,5	APT
ESSA 7 (TOS-E)	16/08/1968	576	145,1	AVCS
ESSA 8 (TOS-F)	15/12/1968	2644	131,5	APT
ESSA 9 (TOS-G)	26/02/1969	1726	145,1	AVCS
ITOS 1 (TIROS M)	23/01/1970	510	309,3	AVCS, APT, FPR, SPM
ITOS-A (NOAA 1)	11/12/1970	252	309,3	AVCS, APT, FPR, SPM
ITOS-B (NOAA 2)	21/10/1971	0	309,3	AVCS, APT, FPR, SPM
ITOS-C	(no lanzado)	—	—	—
ITOS-D (NOAA 2)	15/10/1972	837	333,8	SR, SPM, VTPR, VHRR
ITOS-E (NOAA 3)	16/07/1973	0	340,2	SR, SPM, VTPR, VHRR
ITOS-F (NOAA 3)	06/11/1973	1029	340,2	SR, SPM, VTPR, VHRR
ITOS-G (NOAA 4)	15/11/1974	1463	340,2	SR, SPM, VTPR, VHRR
ITOS-H (NOAA 5)	29/07/1976	1036	340,2	SR, SPM, VTPR, VHRR

Acrónimos y sus significados o equivalencias: APT: Transmisión Automática de Imágenes. AVCS: Sistema Avanzado de Cámaras Vidicon. FPR: Radiómetro de Placa Plana. IR: Infrarrojo. SPM: Monitor de Protones Solares. SR: Radiómetro de Escaneo. TV: Televisión. VHRR: Radiómetro de Muy Alta Resolución. VTPR: Radiómetro de Perfil de Temperatura Vertical.

Los satélites TIROS fueron sucedidos a partir de 1966 por los vehículos de la serie ESSA, desarrollados por la Administración de Servicios Científicos Medioambientales y similares, en configuración, a sus antecesores. La serie ESSA tenía como objetivo establecer un sistema global de satélites meteorológicos. Salvo el ESSA 1, todos los ingenios portaban, bien un dispositivo de Transmisión Automática de Imágenes (APT), o un Sistema Avanzado de Cámaras Vidicon (AVCS). Ambos sistemas estaban dotados de dos cámaras de 800 líneas, las cuales cubrían un área de la Tierra superior a los 10 millones de km². A partir del ESSA 3, los satélites de la serie fueron conocidos asimismo por la denominación TOS (siglas de Satélites Operativos TIROS). Una segunda versión, denominada ITOS (Sistema Operativo Mejorado TIROS), fue puesta en marcha a partir del año 1970, trabajando con ella tanto la ESSA como la NOAA.

La siguiente generación de satélites meteorológicos estadounidenses

Entre los años 1974 y 1975, Estados Unidos lanzó el programa SMS (siglas de Satélite Meteorológico Sincrónico), integrado por dos vehículos que serían los primeros de su clase en alcanzar una órbita geosincrónica. Estos satélites sentaron las bases del programa GOES (Satélites Medioambientales Operativos Geostacionarios), cuyo primer ejemplar, denominado GOES 1 (también conocido como GOES-A), fue enviado a la órbita geoestacionaria el 16 de octubre de 1975.

Los objetivos del programa GOES, gestionado por la NOAA, están enfocados, entre otros aspectos, en el seguimiento mundial de fenómenos meteorológicos para mejorar los pronósticos y predicciones, la observación de las corrientes oceánicas y el seguimiento del caudal de los ríos. Por tanto, este tipo de satélites proporciona datos útiles en los ámbitos de la meteorología y de la climatología.

La flota de la serie GOES opera en dos ubicaciones, denominadas GOES-East (GOES-Este) y GOES-West (GOES-Oeste). La



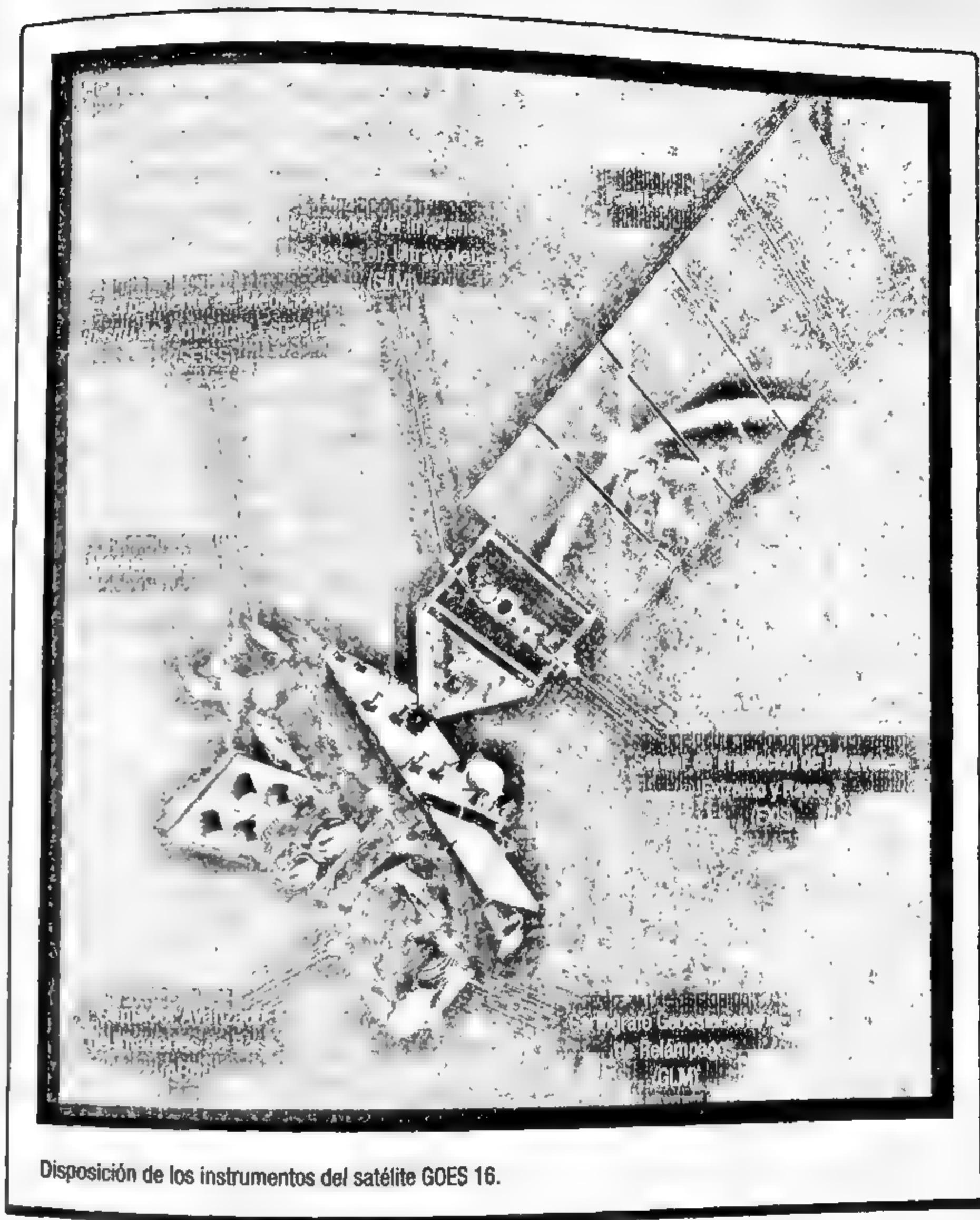
En la foto superior, preparativos del satélite TIROS 1 previos a su lanzamiento al espacio; debajo, la primera imagen de televisión de la Tierra obtenida por dicho satélite.

primera de ellas está sobre el ecuador terrestre, a una longitud de 75° oeste, y los satélites que operan en ella proporcionan información meteorológica concerniente a Estados Unidos y el resto de América. La segunda está localizada en la longitud 135° oeste, sobre el océano Pacífico, suministrando datos sobre dicha región. De los dieciséis satélites lanzados hasta la fecha, cuatro se encuentran operativos (GOES 13, 14, 15 y 16).

Los primeros de la serie generaban imágenes tanto diurnas como nocturnas en los rangos visible e infrarrojo, en intervalos de 20 minutos. El más reciente de ellos, GOES 16 (GOES-R), lanzado el 19 de noviembre de 2016, obtiene imágenes de patrones meteorológicos y tormentas extremas cada cinco minutos, con la posibilidad de reducir ese intervalo a treinta segundos. De esta forma, los datos podrán emplearse de manera más efectiva en caso de desarrollarse fenómenos meteorológicos cuya intensidad suponga un riesgo para las poblaciones afectadas. Además, el GOES 16 (figura 1) es capaz de realizar seguimientos de meteorología espacial, es decir, de los efectos que la actividad solar produce en nuestro planeta.

METEOROLOGÍA POR SATÉLITE TRAS EL TELÓN DE ACERO

Los primeros satélites soviéticos eminentemente meteorológicos comenzaron a poblar la órbita terrestre a partir del año 1964. El motivo por el que tardaron tanto en ser lanzados al espacio radica en que la Unión Soviética no consideraba una prioridad la observación de la Tierra con fines meteorológicos, dado que los recursos destinados a su programa espacial fueron dedicados esencialmente a misiones tripuladas, al lanzamiento de ingenios robóticos más allá de la órbita de nuestro planeta y al reconocimiento militar. No obstante, algunos satélites destinados a esta última función y enmascarados bajo el término Kosmos (como se mencionó en el capítulo anterior) realizaron algunas actividades relacionadas con el ámbito meteorológico. Tal fue el caso del Kosmos 4, lanzado el 26 de abril de 1962, primer satélite soviético no tripulado en transmitir a la Tierra imágenes de la



Disposición de los instrumentos del satélite GOES 16.

cubierta nubosa que envuelve a nuestro planeta. A este aparato le siguieron otros, como los Kosmos 7, 9 y 15, lanzados entre los años 1962 y 1963, y que igualmente portaron instrumentos meteorológicos.

El 28 de agosto de 1964 se lanzó al espacio el Kosmos 44, primer satélite con función principalmente meteorológica. Se trataba de un prototipo experimental de la serie Meteor, término empleado por la Unión Soviética para definir a aquellos ingenios destinados a operaciones meteorológicas, si bien esta designación no fue empleada hasta 1969, con el lanzamiento, el 26 de marzo, del Meteor 1-1, el primero operativo.

El Meteor 1-10, lanzado el 29 de diciembre de 1971, fue el primer satélite soviético en usar la tecnología APT, empleada previamente por el estadounidense TIROS 8. Con un simple receptor que operase en la franja de la frecuencia de los 137 MHz, este sistema permitía a cualquier estación, tanto soviética como occidental, obtener las imágenes captadas por el satélite durante el periodo en que este la sobrevolaba.

La Unión Soviética (hoy Federación Rusa) puso en marcha tres generaciones de satélites Meteor. La primera de ellas, integrada por un total de 35 unidades, fue lanzada entre los años 1964 y 1977. La segunda, formada por 21 satélites, fue puesta en órbita entre 1975 y 1993. La tercera, integrada por 6, fue desplegada en el periodo 1985-1994. Esta última se abrió a la participación internacional tras la caída del Muro de Berlín. Así, el satélite Meteor 3-5 contó, entre sus instrumentos, con el TOMS, acrónimo de Espectrómetro para la Cartografía Total del Ozono, desarrollado por la NASA. Existían planes para expandir la serie con una nueva generación llamada Meteor-3M e integrada por cuatro unidades, pero la financiación disponible solo cubrió la construcción y el lanzamiento de la primera de ellas, denominada Meteor-3M 1. Su puesta en órbita tuvo lugar el 10 de diciembre de 2001. El satélite estuvo operativo cinco años, siendo sucedido por el programa Meteor-M, integrado por dos vehículos, Meteor-M 1 y Meteor-M 2, lanzados en una órbita terrestre polar heliosincrónica baja en 2009 y 2014, respectivamente, con una versión mejorada en perspectiva, llamada Meteor-M2, cuya puesta en marcha está previsto tenga lugar en algún momento a partir de 2017.

Por otra parte, el 20 de enero de 2011, Rusia lanzó el primero de una nueva generación de satélites meteorológicos geoestacionarios. Denominados Elektro-L, estos ingenios generan imá-

HARRY WEXLER: EL PADRE DE LA METEOROLOGÍA POR SATÉLITE

El Dr. Harry Wexler nació el 15 de marzo de 1911 en la localidad de Fall River (Estados Unidos). En 1929 ingresó en la Universidad de Harvard, y en 1939 obtuvo el doctorado en meteorología por el prestigioso Instituto de Tecnología de Massachusetts (MIT). Trabajó durante casi toda su vida profesional en la Oficina Meteorológica de Estados Unidos (que más tarde llegó a ser la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica, NOAA), de la que fue jefe de investigación. En ella desarrolló programas destinados al estudio de la atmósfera que incluyeron observaciones realizadas desde aeronaves (en 1944 se convirtió en el primer científico que se introdujo en el ojo de un huracán para obtener datos), el lanzamiento de cohetes sonda y el uso de computadoras para la elaboración de pronósticos meteorológicos.

En los albores de la Era Espacial

En el marco del Año Geofísico Internacional 1957-1958, Wexler participó como jefe científico en la expedición estadounidense emprendida a tierras antárticas durante la cual realizó medidas de gases traza, como el dióxido de carbono y el ozono. Ya desde principios de la década de 1950, defendía la idea de la utilización de satélites con fines meteorológicos. Iniciada la Era Espacial, se convirtió en figura clave en programas como los Explorer y TIROS, y predijo el importante papel que los satélites jugarían en el seguimiento de fenómenos meteorológicos extremos y en el estudio de la evolución del clima de la Tierra. Promovió la idea del establecimiento de un sistema de vigilancia meteorológica y climática mundial. El 11 de agosto de 1962, Wexler fallecía a causa de un ataque al corazón. Su concepto de sistema mundial meteorológico comenzó a materializarse un año después.



Harry Wexler examinando un mapa meteorológico. La fotografía fue tomada en abril de 1960.

genes de la Tierra en las franjas visible e infrarroja del espectro. Los satélites de la serie Elektro-L son controlados por la Agencia Espacial Rusa (Roscosmos), el Centro de Investigación Científica de Hidrometeorología «Planeta» y el Servicio Federal para el Seguimiento de la Hidrometeorología y Medioambiente «Roshydromet». Junto a su sucesor, Elektro-L 2, puesto en órbita el 11 de diciembre de 2015, esta nueva generación de satélites trabaja en conjunto con el único satélite ruso de este tipo hasta ahora operativo, Meteor-M 2. De este modo, Rusia pretende restablecer su red de satélites meteorológicos.

LA ENTRADA DE EUROPA EN LA METEOROLOGÍA POR SATÉLITE

Los primeros estudios en Europa para el establecimiento de un programa de satélites meteorológicos surgieron a finales de la década de 1960 en el seno del Centro Nacional de Estudios Espaciales (CNES), organismo francés responsable de todas las actividades que el país galo realiza en el ámbito del espacio exterior. Tales estudios contemplaban el desarrollo de un radiómetro para su instalación en un satélite destinado a la órbita geoestacionaria. Esta iniciativa, que pasó a denominarse Meteosat, fue presentada en el año 1972 a la Organización Europea de Investigación Espacial (ESRO), entidad precursora de la actual Agencia Espacial Europea (ESA, fundada en 1975). Ocho de los estados miembros de aquella organización (Bélgica, Dinamarca, Francia, Italia, Alemania, Reino Unido, Suecia y Suiza) asumieron la financiación del proyecto.

El programa Meteosat

El primero de los satélites de la serie, Meteosat 1, fue lanzado el 23 de noviembre de 1977 y prestó sus servicios de manera ininterrumpida durante dos años completos, hasta que su radiómetro dejó de funcionar. Su sucesor, Meteosat 2, fue puesto en órbita en 1981, año en que la ESA celebró una conferencia intergubernamental en la que participaron 17 estados miembros de la Agencia y en el marco de la cual se adoptaron sendos acuerdos para dar continuidad al programa Meteosat a largo plazo, y para la creación de un organismo que se responsabilizara de gestionar la utilización de estos satélites, que posteriormente pasó a llamarse EUMETSAT (Organización Europea para la Explotación de Satélites Meteorológicos). En marzo de 1983, los estados miembros de la ESA acordaron la construcción de tres satélites más, los Meteosat 4, 5 y 6, que fueron lanzados entre los años 1989 y 1993 al objeto de establecer tal continuidad. El Meteosat 3, un antiguo prototipo de ingeniería reacondicionado, fue lanzado en 1988 con el objetivo de llenar el vacío existente hasta el despegue del Meteosat 4. Todos estos satélites pertenecen a la llamada Primera Generación (MFG, por sus siglas en inglés), también denominada Programa Operativo Meteosat (MOP). Un séptimo satélite de la serie, lanzado al espacio el 2 de septiembre de 1997, constituye el puente entre la primera y segunda generaciones de este tipo de aparatos, por lo que se le incluye dentro del Programa de Transición Meteosat (MTP).

Con la evolución de la tecnología, los primeros satélites de la serie Meteosat fueron paulatinamente remplazados por una segunda generación, conocida como MSG (siglas, en inglés, de Segunda Generación Meteosat; véase la tabla de la página siguiente). El primero fue lanzado el 28 de agosto de 2002. Conocido inicialmente por su designación técnica MSG 1, este satélite pasó a denominarse Meteosat 8 a partir del 29 de enero de 2004. Este cambio de denominación también afectó a los siguientes satélites de la segunda generación. Así, el MSG 2, lanzado al espacio el 21 de diciembre de 2005, fue rebautizado como Meteosat 9. El último lanzado hasta ahora, Meteosat 11 (MSG 4), permanece en el espacio desde el 15 de julio de 2015 como satélite de reserva, y entrará en funcionamiento en el momento en que alguno de ellos se averíe, para dar continuidad al programa hasta la puesta en marcha de la tercera generación de satélites Meteosat (MTG), que se estima tendrá lugar en torno al año 2020.

Entre los objetivos que la segunda generación de satélites Meteosat pretende alcanzar figuran los siguientes:

- Suministrar *imágenes multiespectrales* (representadas con diferentes longitudes de onda) básicas para realizar el seguimiento del desarrollo de sistemas nubosos con el propósito de elaborar pronósticos a corto plazo sobre Europa y África.
- Suministrar imágenes de alta resolución para el seguimiento de la evolución de fenómenos meteorológicos significativos a escala local, ligados a la convección, la niebla y la nieve.
- Realizar análisis de la masa de aire con el objetivo de monitorizar procesos de inestabilidad atmosférica en los niveles inferiores de la troposfera mediante la determinación de la temperatura vertical y los gradientes de humedad.
- Efectuar medidas de la temperatura de la superficie terrestre y oceánica y determinar sus variaciones diurnas para su utilización en modelos numéricos y en la realización de pronósticos.

LOS SATÉLITES DE LA SERIE METEOSAT		
Satélite	Fecha de lanzamiento	Estado
Meteosat 1	23/11/1977	Retirado el 25/11/1979
Meteosat 2	19/06/1981	Retirado el 11/08/1988
Meteosat 3	15/06/1988	Retirado el 31/05/1995
Meteosat 4	06/03/1989	Retirado el 08/11/1995
Meteosat 5	02/03/1991	Retirado el 16/04/2007
Meteosat 6	20/11/1993	Retirado el 15/04/2011
Meteosat 7	02/09/1997	Operativo
Meteosat 8 (MSG 1)	28/08/2002	Operativo
Meteosat 9 (MSG 2)	21/12/2005	Operativo
Meteosat 10 (MSG 3)	05/07/2012	Operativo
Meteosat 11 (MSG 4)	15/07/2015	En situación de reserva

LOS SERVICIOS PROPORCIONADOS POR LOS METEOSAT

Los vehículos de la serie Meteosat se encuentran ubicados en órbita geoestacionaria, sobre la latitud 0°, y tienen como principal objetivo la obtención de imágenes del disco terrestre y su cubierta nubosa. Desde su posición, son capaces de observar un área que comprende los continentes europeo y africano, Oriente Medio y parte de América del Sur. Estos satélites pueden producir imágenes tanto en condiciones diurnas como nocturnas, las cuales son transmitidas a los centros de control en un plazo de tiempo mínimo. Este objetivo se logra gracias a los radiómetros que portan, capaces de obtener registros tanto en el rango visible como en el infrarrojo.

Una incansable fuente de imágenes

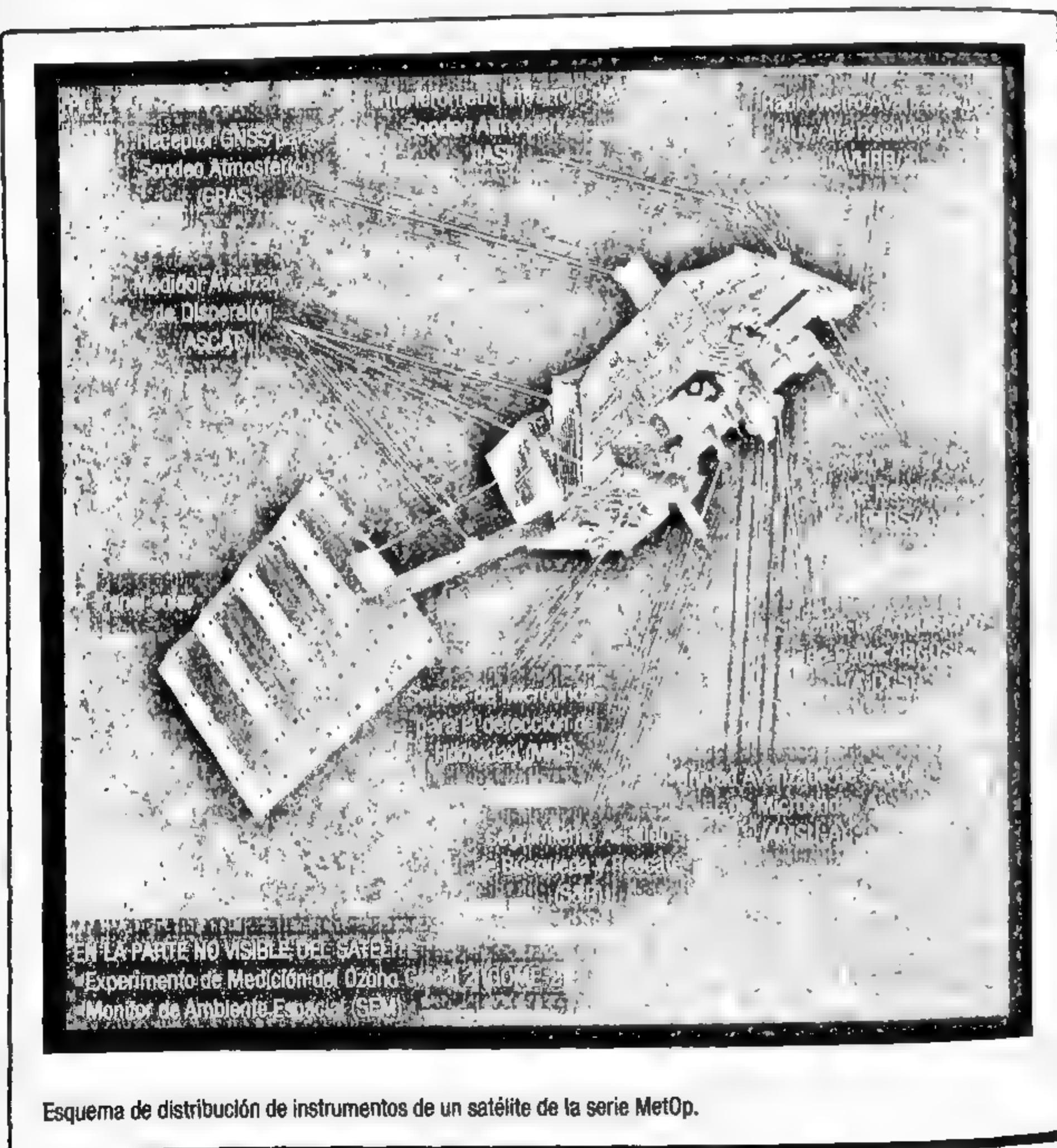
Las imágenes de la Tierra producidas por los primeros Meteosat eran generadas en intervalos de 30 minutos. La segunda generación de estos satélites ha sido capaz de reducir ese intervalo a la mitad. Las imágenes son enviadas a dos estaciones primarias, una de ellas localizada en Fucino (Italia, para el Meteosat 7) y otra en Usingen (Alemania, para los Meteosat de la segunda generación). Estos centros, dotados de transmisores de microondas de 34 megabits, las retransmiten posteriormente a la central de EUMETSAT en Darmstadt (Alemania) para su procesado, distribución y archivo.



Impresión artística de un satélite Meteosat de Segunda Generación en órbita geoestacionaria.

Meteorología europea desde la órbita polar

El programa MetOp (figura 2) es la apuesta europea por establecer un sistema de satélites meteorológicos en órbita baja polar heliosincrónica, conocido por las siglas EPS (Sistema Polar EUMETSAT). Este programa pretende abarcar un periodo de catorce años, mediante el lanzamiento de satélites durante el



arco 2006-2018 (véase la tabla siguiente), con la meta de ofrecer nuevos y mejorados servicios de teledetección en el campo no solo de la meteorología, sino también en el de la climatología. Los instrumentos que portan estos satélites, de manufactura tanto europea como estadounidense, generan información de gran utilidad para la elaboración de modelos avanzados de predicción meteorológica numérica.

CARACTERÍSTICAS DE LOS SATÉLITES METOP			
Satélite	Fecha de lanzamiento	Posición	Servicios ofrecidos
MetOp-A	19/10/2006	Órbita polar heliosincrónica	- Servicio de datos globales y regionales
MetOp-B	17/09/2012		- Servicio directo de lectura de datos
MetOp-C	Previsto para 10/2018		- Generación de imágenes en tiempo real

LA METEOROLOGÍA POR SATÉLITE EN ASIA

El lanzamiento de vehículos destinados a la observación de la Tierra con fines meteorológicos se ha ido extendiendo con el transcurso de los años. En Asia, es China el país que lidera la puesta en órbita de satélites de este tipo, seguido de Japón. Algunos países cuentan con ingenios cedidos por otras potencias, y aquellos que no disponen de ellos suplen esta carencia mediante la contratación de servicios meteorológicos por satélite a otras naciones.

Los girasoles meteorológicos nipones

Himawari («girasol» en japonés) es la denominación de los satélites lanzados por el país nipón y controlados por la Agencia Japonesa de Meteorología (JMA; véase la tabla de la página siguiente). También prestan servicios a Australia, Nueva Zelanda y otros países de la región occidental del océano Pacífico.

El primero de estos satélites, Himawari 1 (también conocido por la denominación técnica GMS 1), fue puesto en órbita el 14 de julio de 1977 a bordo de un cohete Delta 2914 desde Cabo Cañaveral, Florida (Estados Unidos), y prestó sus servicios durante doce años. A partir del segundo de los satélites de la serie, Himawari 2, todos los componentes de este programa despegan desde territorio japonés, concretamente desde el Centro Espacial de Tanegashima. Hasta la fecha, se han lanzado tres generaciones de satélites Himawari. El más reciente partió al espacio el 2 de noviembre de 2016.

LOS SATÉLITES DE LA SERIE HIMAWARI			
Nombre	Fecha de lanzamiento	Fecha de baja	Generación
GMS 1 (Himawari 1)	14/07/1977	10/1989	1. ^a
GMS 2 (Himawari 2)	10/08/1981	11/1987	1. ^a
GMS 3 (Himawari 3)	02/08/1984	06/1995	1. ^a
GMS 4 (Himawari 4)	05/09/1989	02/2000	1. ^a
GMS 5 (Himawari 5)	18/03/1995	07/2005	1. ^a
MTSAT 1 (Mirai 1)	15/11/1999	Fallo de lanzamiento	2. ^a
MTSAT 1R (Himawari 6)	26/02/2005	12/2015	2. ^a
MTSAT 2 (Himawari 7)	18/02/2006	En posición de espera	2. ^a
Himawari 8	07/10/2014	Operativo	3. ^a
Himawari 9	02/11/2016	En proceso de traspaso	3. ^a

Viento y nubes procedentes de China

China también ha lanzado satélites meteorológicos al espacio de forma independiente. Sus actividades en este ámbito se iniciaron en el año 1988, con la puesta en marcha del programa Fengyun (Viento y Nubes en chino), conocido asimismo por su acrónimo FY. Desde entonces, se han sucedido tres generaciones de satélites, con una cuarta actualmente en estudio. La primera de ellas,

KATRINA: UNA TORMENTA MORTAL

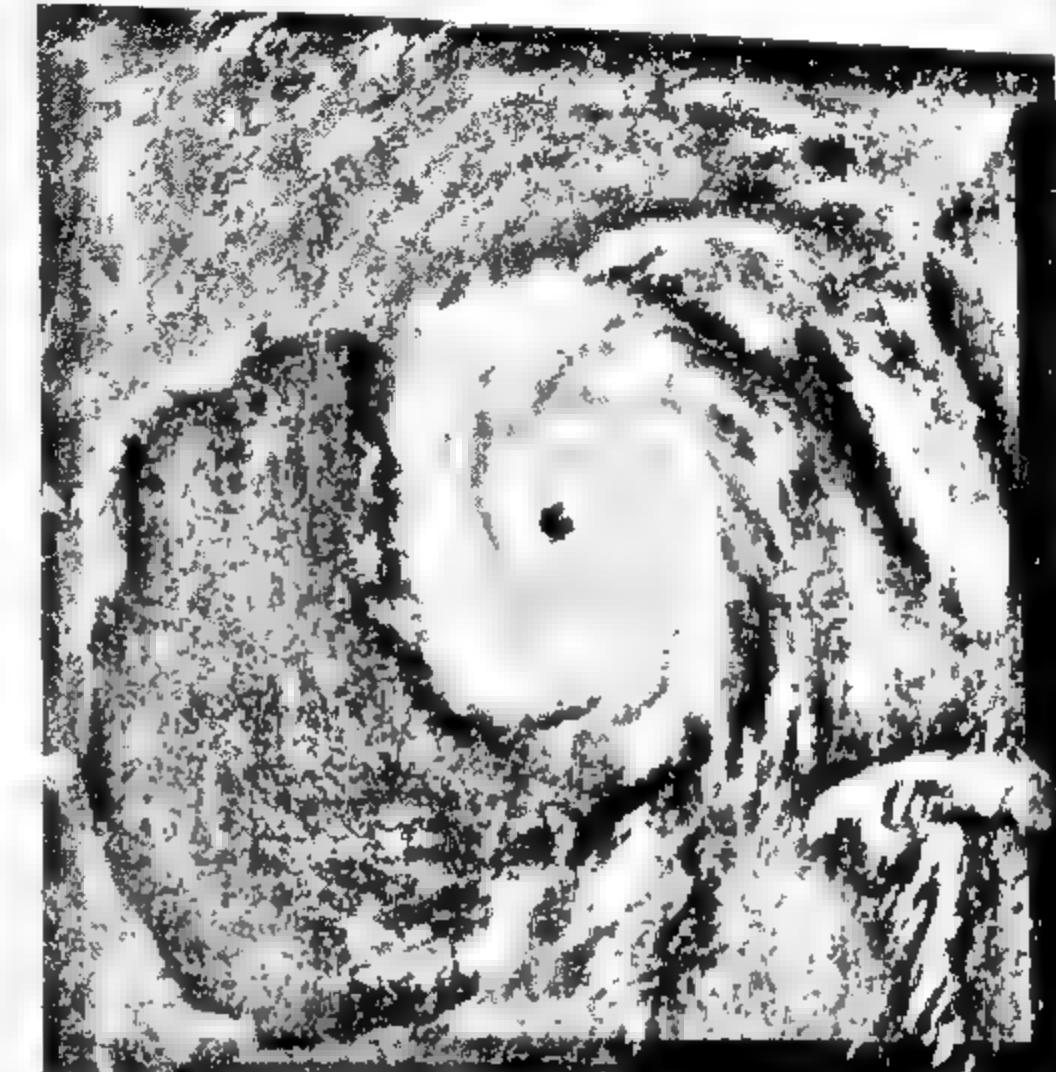
El año 2005 pasó a los anales de la historia de la meteorología por el desarrollo de una de las tormentas más intensas y mortales de la historia reciente: el huracán Katrina. Este fenómeno, que fue creciendo en tamaño e intensidad conforme se adentraba en el golfo de México, afectó gravemente a condados de los estados de Mississippi, Alabama y Louisiana (Estados Unidos). En este último, la ciudad de Nueva Orleans quedó completamente anegada y muchas personas perdieron su vida.

Un seguimiento continuo

Entre el 26 y el 30 de agosto de aquel año, los satélites de la NOAA generaron imágenes cada cinco minutos para realizar el seguimiento más detallado posible de la evolución y tránsito de este gigantesco huracán. Los datos obtenidos por estos satélites ayudaron a predecir su trayectoria y determinar qué regiones iban a sufrir con mayor intensidad los vientos y lluvias que acompañaban a este amenazador fenómeno de la naturaleza. Esta información fue esencial para poner en marcha los protocolos de evacuación de las poblaciones amenazadas, que salvaron miles de vidas humanas. El Katrina alcanzó la categoría 5 después de cruzar las aguas cálidas del golfo de México. Gracias a los datos obtenidos por los radiómetros y altímetros de los satélites, los científicos pudieron realizar un seguimiento del proceso de intensificación del huracán. Esos datos fueron y siguen siendo de vital importancia para conocer y predecir el comportamiento de estos fenómenos y, así, estar mejor preparados para afrontarlos en ocasiones futuras.

¿Cómo se clasifican los huracanes?

La velocidad de los vientos generados por los huracanes es medida por una escala llamada Saffir-Simpson que se divide en cinco categorías cuyo valor numérico es proporcional a la velocidad sostenida de dichos vientos: categoría 1: 119-153 km/h; categoría 2: 154-177 km/h; categoría 3: 178-208 km/h; categoría 4: 209-251 km/h, y categoría 5: a partir de 252 km/h. Los huracanes de las dos últimas categorías son clasificados como catastróficos, y su nivel de destrucción es masivo.



El huracán Katrina captado el 28 de agosto de 2005 por un satélite GOES.

Climatología

Fengyun-1, está integrada por cuatro satélites que fueron lanzados entre 1988 y 2002 en una órbita baja polar heliosincrónica, provistos de radiómetros que operan tanto en el rango visible como en el infrarrojo. La segunda generación, Fengyun-2, engloba a siete satélites puestos en órbita entre 1997 y 2014 en órbita geoestacionaria. Entre sus prestaciones figuran la de realizar observaciones en plazos de tiempo cortos y la generación de imágenes estereoscópicas (aquellas que dan la sensación de profundidad) de las formaciones nubosas. La tercera generación, Fengyun-3, se encuentra actualmente en desarrollo, y se prevé concluya en torno al año 2021. Son satélites que operan en órbita terrestre baja polar, capaces de obtener lecturas mejoradas de la temperatura vertical y de la humedad, la detección de ozono y la generación de imágenes en los rangos visible, infrarrojo y microondas. La cuarta generación entrará en funcionamiento en los próximos años, y sus integrantes serán puestos en órbita geoestacionaria. Tendrán la capacidad de generar imágenes en intervalos de 7,5 minutos.

DIANE ACKERMAN

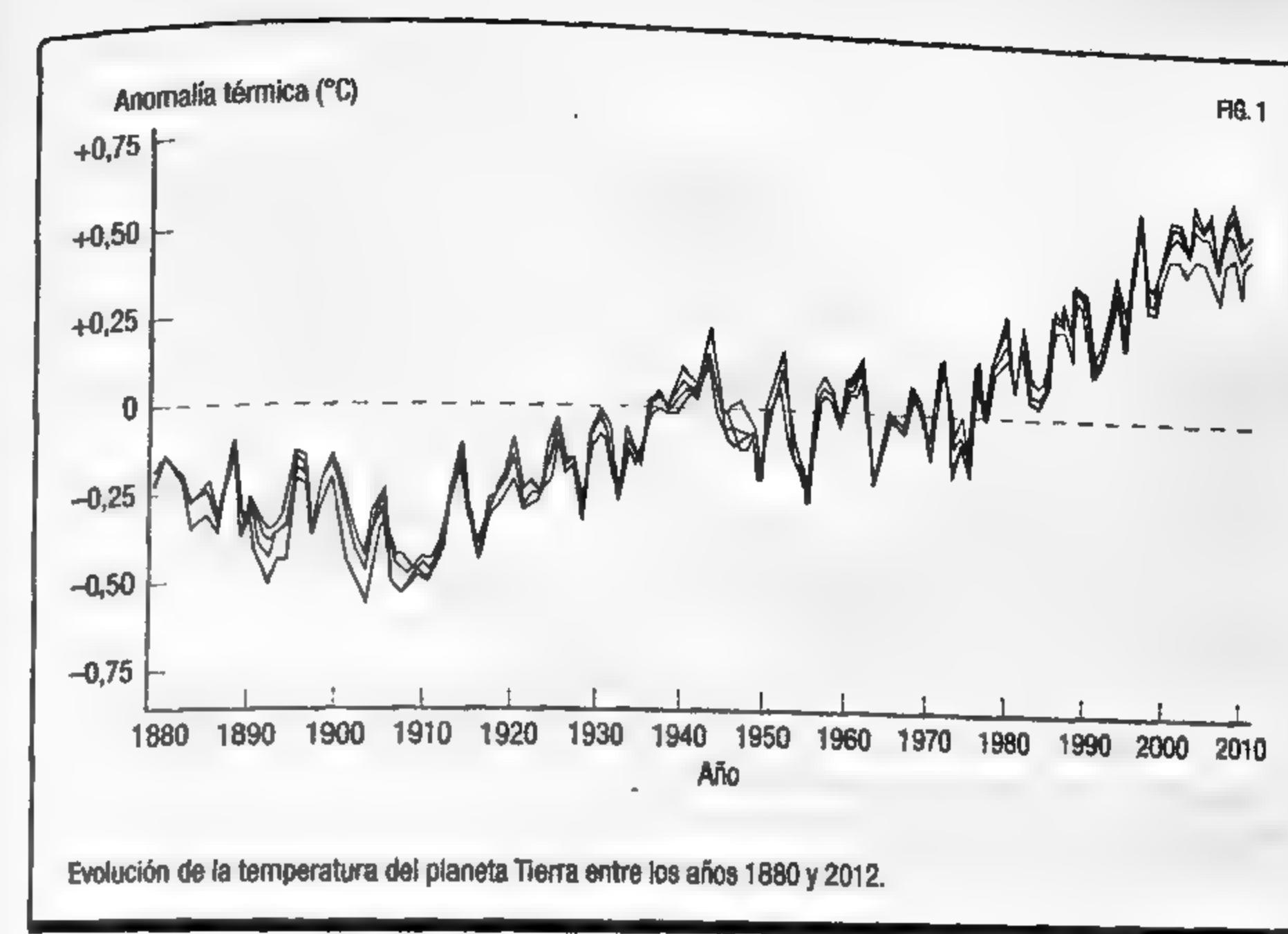
Durante los primeros años de la meteorología, los satélites fueron demostrando su utilidad de cara a la elaboración de modelos y pronósticos del comportamiento de la atmósfera a corto y medio plazo a escala regional, a la par que evidenciaron su potencial para estudiar este comportamiento a largo plazo y a escala mundial.

¿Qué es el *clima*? Existen muchas formas de definir este término, aunque aquí utilizaremos la más breve y efectiva: la descripción del patrón meteorológico a largo plazo, bien a escala regional, como puede ser un país o un continente, o global, es decir, el planeta en su totalidad.

El clima reinante en un planeta depende de muchos factores, siendo los principales su proximidad al Sol y el intercambio energético entre el astro en cuestión y el medio espacial, ambos interrelacionados. Planetas como Venus están sometidos a temperaturas extremadamente elevadas, superiores al punto de fusión del plomo, que en este caso en particular se ven potenciadas por las características de su atmósfera, que retiene la mayor parte de la energía recibida del Sol, no dejándola escapar al espacio. Por contra, Plutón, uno de los cuerpos celestes más alejados del astro rey en nuestro sistema, está inmerso en un profundo y eterno invierno, con temperaturas muy por debajo del punto de congelación del agua. Su atmósfera es tan sutil que el planeta apenas retiene la radiación recibida del Sol. Sin embargo, la Tierra se encuentra en lo que los científicos espaciales denominan *zona habitable*, una región cuya distancia al Sol permite que el

agua fluya en estado líquido, contribuyendo así al florecimiento de formas de vida. Además, las características de la atmósfera terrestre permiten un intercambio de energía ciertamente equilibrado, lo que fomenta que el planeta disfrute de temperaturas suaves, en comparación con otros astros. No obstante, el clima de la Tierra no es homogéneo. Las regiones tropicales y ecuatoriales están más expuestas a la radiación procedente del Sol y, por tanto, son las que mayores cotas de temperatura soportan, sobrepasando, en ocasiones, los 60 °C. En contraste, los polos norte y sur son las regiones en las que la incidencia de la radiación solar es notablemente inferior, motivo por el cual mantienen temperaturas sensiblemente por debajo de los 0 °C (en la Antártida se han llegado a registrar -92 °C), aunque en ocasiones pueden alcanzar cotas positivas. Por otro lado, existen fenómenos que están poniendo en riesgo este equilibrio de intercambio de energía. Las emisiones de gases como el metano y el dióxido de carbono son las causantes del *efecto invernadero*, un fenómeno claramente visible en Venus, que desequilibra la balanza del intercambio energético a nivel planetario. Ese es el motivo por el que la temperatura global de la Tierra ha experimentado un aumento de más de un grado en el último siglo (figura 1). Aunque el calentamiento global es un proceso natural que nuestro planeta sufre desde hace miles de años, la acción del hombre está contribuyendo a acelerar este proceso en tasas centenares de veces superiores al ritmo natural.

La órbita de la Tierra alrededor de nuestra estrella es el lugar ideal desde el que medir el intercambio de energía entre nuestro planeta y el medio espacial, y su variabilidad a lo largo y ancho del globo. Por tanto, los satélites artificiales se han constituido como la herramienta definitiva en el estudio del clima terrestre. Al igual que en la meteorología, en la que los satélites son esenciales para la elaboración de predicciones a corto y medio plazo, estos ingenios son de vital importancia no solo para determinar las características climáticas de la Tierra, sino también para la elaboración de modelos que nos permitan pronosticar con suficiente antelación su evolución y consecuencias para el ecosistema global.



LA CLAVE PARA ENTENDER EL CLIMA: EL EQUILIBRIO ENERGÉTICO DE LA TIERRA

Como se ha dicho, de la radiación procedente del Sol que llega a la Tierra, una parte es reflejada al espacio exterior y otra calienta el planeta, manteniéndose así el equilibrio energético. Dado que gran parte de la energía recibida es térmica, la longitud de onda más útil para conocer ese intercambio energético es el infrarrojo (IR). Ese es el motivo por el que la mayoría de los aparatos en órbita terrestre que estudian el clima están dotados de radiómetros que operan en dicha frecuencia.

El 13 de octubre de 1959 despegaba desde Cabo Cañaveral el Explorer 7, un vehículo de 76 cm de alto por 76 de ancho, con la forma de dos conos truncados unidos por sus bases. Este pequeño satélite portaba un radiómetro que, entre los años 1959 y 1961, y operando en el rango del infrarrojo, se convirtió en el primer artefacto que midió la energía recibida y emitida por nues-

tro planeta. Los resultados determinaron que la Tierra era más cálida y oscura en comparación con las medidas realizadas antes del inicio de la Era Espacial, lo que evidenciaba la presencia de un mecanismo regulador de la temperatura global del planeta que evita que la energía se concentre en el ecuador y en los trópicos, distribuyéndola hacia las regiones próximas a los polos. Este mecanismo regulador experimenta cambios en respuesta a la actividad humana, y es clave para determinar cómo reacciona el clima de la Tierra ante los gases de efecto invernadero.

Otros satélites, como los Nimbus 6 y 7, lanzados en 1975 y 1978, respectivamente, también realizaron medidas del intercambio energético de la Tierra, aunque las lecturas que estos obtuvieron no fueron sistemáticas y su precisión no era lo suficientemente alta como para determinar con exactitud tal intercambio energético.

El 5 de octubre de 1984, la NASA lanzó al espacio el transbordador Challenger (misión STS 41G) con siete astronautas a bordo para efectuar, entre otras operaciones, el despliegue en la órbita terrestre del ERBS (siglas, en inglés, de Satélite para la Medida del Equilibrio Energético de la Tierra). Este vehículo fue el primero lanzado en el marco de un programa de investigación denominado ERBE (Experimento para la Medida del Equilibrio Energético de la Tierra). Al ERBS le siguieron los satélites NOAA 9 y 10 en 1984 y 1986, respectivamente, dotados de la misma instrumentación con la idea de medir la energía reflejada y emitida por la Tierra en varios niveles espaciales, de forma sistemática y con una precisión mucho mayor que la obtenida por los Nimbus 6 y 7. En conjunto, las observaciones realizadas por estos tres vehículos del programa ERBE suministraron datos de gran importancia para la realización de estudios sobre la variación geográfica y estacional en el balance de radiación de la Tierra. Estos datos se ven complementados con los obtenidos por los instrumentos CERES (acrónimo de Sistema de Energía Radiante de la Tierra y de las Nubes) transportados a bordo de los satélites TRMM (Misión para la Medición de la Pluviometría Tropical), Terra y Aqua, puestos en órbita entre los años 1997 y 2002, y de los cuales están actualmente operativos los dos últimos.

MISIONES DE ESTUDIO DEL EQUILIBRIO ENERGÉTICO TERRESTRE				
Satélite	País	Fecha de lanzamiento	Localización	Instrumento
Explorer 7	EE. UU.	13/10/1959	Órbita terrestre baja	Radiómetro IR
Nimbus 6	EE. UU.	12/06/1975	Órbita polar heliosincrónica	ERB
Nimbus 7	EE. UU.	24/10/1978	Órbita polar heliosincrónica	ERB
ERBS	EE. UU.	05/10/1984	Órbita terrestre baja	ERBE
NOAA 9	EE. UU.	12/12/1984	Órbita polar heliosincrónica	ERBE
NOAA 10	EE. UU.	17/09/1986	Órbita polar heliosincrónica	ERBE
Meteor 3-6	Federación Rusa	25/01/1994	Órbita terrestre baja	ScaRaB
TRMM	EE. UU.	27/11/1997	Órbita terrestre baja	CERES
Resurs 01-4	Federación Rusa	10/07/1998	Órbita polar heliosincrónica	ScaRaB
Terra	EE. UU.	18/12/1999	Órbita polar heliosincrónica	CERES
Aqua	EE. UU.	04/05/2002	Órbita terrestre baja	CERES
Meteosat 8 (MSG 1)	Europa	28/08/2002	Órbita geoestacionaria	GERB
Parasol	Francia	18/12/2004	Órbita polar heliosincrónica	POLDER
Meteosat 9 (MSG 2)	Europa	21/12/2005	Órbita geoestacionaria	GERB
Cloudsat/CALIPSO	Francia, EE.UU.	28/04/2006	Órbita polar heliosincrónica	IIR
Fengyun 3A	China	27/05/2008	Órbita polar heliosincrónica	SIM/ERM
Fengyun 3B	China	04/11/2010	Órbita polar heliosincrónica	SIM/ERM
Suomi NPP	EE. UU.	28/10/2011	Órbita polar heliosincrónica	CERES
Megha-Tropiques	India, Francia	12/10/2011	Órbita terrestre baja	ScaRaB
GCOM-W «Shizuku»	Japón	17/05/2012	Órbita polar heliosincrónica	SGLI
Meteosat 10 (MSG 3)	Europa	05/07/2012	Órbita geoestacionaria	GERB
Fengyun-3C	China	23/09/2013	Órbita polar heliosincrónica	SIM/ERM
Meteosat 11 (MSG 4)	Europa	15/07/2015	Órbita geoestacionaria (en situación de reserva)	GERB

Acrónimos y sus significados o equivalencias: CERES: Sistema de Energía Radiante de la Tierra y de las Nubes. ERB: Equilibrio Energético de la Tierra. ERBE: Experimento para la Medida del Equilibrio Energético de la Tierra. ERBS: Satélite para la Medida del Equilibrio Energético de la Tierra. ERM: Medida de la Radiación Terrestre. GERB: Equilibrio Energético de la Tierra Geoestacionario. IIR: Radiómetro captador de Imágenes en Infrarrojo. POLDER: Polarización y Dirección de la Reflectancia de la Tierra. ScaRaB: Escáner para el Equilibrio Energético. SGGL: Captador de Imágenes Globales de Segunda Generación. SIM: Monitor de Irradiación Solar.

El ERBE ha proporcionado unos datos de gran precisión a lo largo del tiempo que han permitido determinar el balance de radiación de la Tierra tanto en escenarios de cielos despejados como de cielos nubosos, demostrando que las nubes duplican el *albedo* terrestre, esto es, la proporción de reflexión de la luz recibida desde el Sol, de 0,15 en el primer escenario a 0,3 en el segundo, y que, además, estas reducen la radiación térmica emitida al espacio por nuestro planeta. Medir la cantidad de energía que la atmósfera terrestre es capaz de retener y de emitir al espacio es clave para poder determinar el índice del efecto invernadero de la Tierra. Gracias al ERBE, se han podido obtener lecturas que han permitido calcular dicho índice en cualquier parte de nuestro planeta. Así, se sabe que el nivel medio se sitúa en los 155 W/m² (vatos por metro cuadrado), con variaciones significativas en función del estado de la atmósfera, alcanzando cotas de 270 W/m² en regiones tropicales y ecuatoriales, muy húmedas y con cielos nubosos, y de 100 W/m² en regiones próximas a los polos, donde predominan los cielos despejados y niveles de humedad muy bajos. De todo ello se desprende que el vapor de agua contribuye al efecto invernadero del planeta, pero en una proporción extremadamente mínima en comparación con otros gases como el metano o el dióxido de carbono. Las nubes, compuestas principalmente de vapor de agua, producen un efecto antagónico en función de su altitud. De esta forma, aquellas situadas en cotas bajas (nubes de bajo nivel) tienden a refrigerar la Tierra reflejando una mayor cantidad de luz procedente del Sol. Por el contrario, las nubes situadas a grandes altitudes (alto nivel) absorben una mayor cantidad de energía, contribuyendo así a una elevación térmica de la atmósfera. A estas alturas cabría preguntarse: ¿qué hay de la energía térmica producida por la propia Tierra y qué papel desempeña en el balance energético? El flujo geotérmico generado en el interior de nuestro planeta se sitúa en torno a los 47 teravatios (47 billones de vatios, cuya distribución a lo largo y ancho del globo terráqueo da como resultado una proporción de 0,087 W/m²), es decir, aproximadamente el 0,027% de la energía total del planeta en su superficie. Teniendo en cuenta que la radiación recibida

del Sol es del orden de 173 000 teravatios, la energía térmica de la Tierra no supone una cantidad relevante.

Algunos satélites con misión eminentemente meteorológica, como los chinos de la serie Fengyun-3 y los europeos Meteosat, portan asimismo instrumentos para medir el equilibrio energético de la Tierra, lo que demuestra la importancia que ha cobrado la obtención de datos a este respecto en el ámbito internacional. Y es que el balance energético de la Tierra es la base sobre la que se asienta el clima de nuestro planeta. Ha sido, precisamente, su seguimiento a largo plazo el que ha permitido determinar una paulatina elevación de la temperatura de la Tierra como consecuencia de una tasa de radiación solar absorbida mayor que la reflejada al espacio, una circunstancia que, como se explicaba anteriormente, es debida a factores naturales, como la actividad biológica y volcánica, pero que se está viendo sobremanera acelerada por la acción del ser humano, con la indiscriminada emisión de gases a la atmósfera, como el dióxido de carbono, uno de los más importantes productos derivados de la quema de combustibles fósiles y de grandes masas forestales.

No hay mayor desafío, al que la humanidad se haya enfrentado, que el cambio climático.

BARACK OBAMA

EL MECANISMO DEL EFECTO INVERNADERO

La temperatura media global en la Tierra depende, en líneas generales, del equilibrio entre la radiación térmica entrante y la saliente (figura 2). El papel que desempeña la atmósfera en este sistema de regulación térmica puede cambiar si lo hace la composición química de esta. La atmósfera de nuestro planeta está compuesta principalmente de oxígeno y nitrógeno (elementos que precisamos para respirar), más una serie de gases como el dióxido de carbono (CO₂), el metano (CH₄) y otros gases traza en proporción mínima como, por ejemplo, el argón. Mientras el oxígeno y el nitrógeno que respiramos son transparentes a la radiación solar, es decir, no influyen en el equilibrio energético de

FIG. 2

Diagrama que muestra de manera muy simplificada el conjunto de vías principales por las que el calor entra en la Tierra, transita por ella y sale del planeta. En condiciones normales, este conjunto de vías mantiene estable la temperatura media global, ya que el balance neto entre calor entrante y calor saliente es el correcto. Si la atmósfera aumenta su capacidad de retener calor, como ocurre al volverse más abundantes en ella los gases de efecto invernadero, ese equilibrio inicial se rompe y la temperatura media global aumenta.



nuestro planeta, el dióxido de carbono y el metano se muestran opacos y retienen la energía. En términos normales, la superficie de la Tierra absorbe una cantidad neta de radiación térmica recibida del Sol del orden del 17%, de la que un 12% es reflejada al espacio exterior. La diferencia, alrededor del 5%, es absorbida por los gases de efecto invernadero presentes en la atmósfera, un proceso natural que hace de nuestro planeta un lugar habitable.

¿Cómo funcionan los gases de efecto invernadero?

Estos gases retienen la energía procedente del Sol, que posteriormente es emitida en forma de calor a la atmósfera de manera omnidireccional (en todas las direcciones). Al encontrarse en su camino con más moléculas de estos gases, ese calor es nuevamente absorbido y el proceso vuelve a repetirse. Una pequeña parte de él es emitido hacia el exterior y logra escapar al espacio, pero una cantidad significativa queda retenida en la atmósfera y termina siendo absorbida por la superficie terrestre.

El papel del ser humano

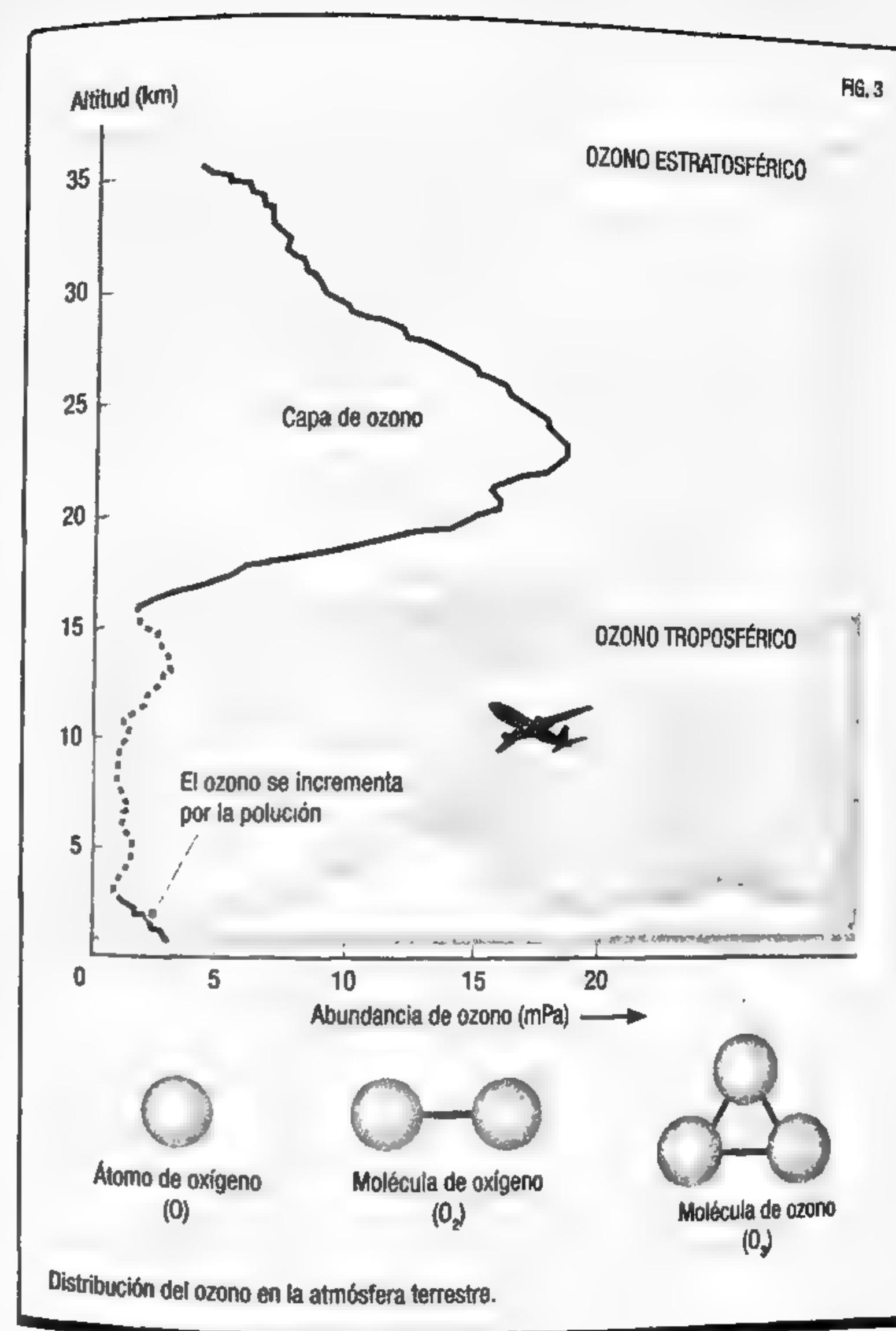
El efecto invernadero es un proceso natural, dado que los gases como el CO₂ y el CH₄ se encuentran presentes en la atmósfera terrestre desde hace miles de millones de años, y los dos están basados en el carbono, el punto de partida de todas las formas de vida conocidas. Fenómenos naturales como la actividad volcánica son responsables de la emisión a la atmósfera de estos gases. Incluso formas de vida como el ser humano los emiten al realizar sus funciones fisiológicas, como la respiración, la digestión y la excreción. Sin embargo, y a pesar de ser un fenómeno natural, el efecto invernadero está siendo acelerado de manera artificial por la acción de los humanos. Esta aceleración nació con la Revolución industrial a finales del siglo XIX, momento en el que comenzaron a aparecer multitud de máquinas cuyo funcionamiento se basaba en la combustión de materiales fósiles como el petróleo y el carbón, una técnica que se ha prolongado hasta nuestros días. Ello ha traído consigo una indiscriminada emisión de CO₂ a la atmósfera terrestre, producto inmediato de dicha combustión, y fue entonces cuando la temperatura del planeta comenzó a describir un patrón de calentamiento antinatural. Sus efectos se están percibiendo a nivel global, con fenómenos meteorológicos cuyos patrones de comportamiento muestran ciertas anomalías. Ese calentamiento acelerado está dando origen a una nueva amenaza para la vida en la Tierra: el cambio climático.

EL OZONO: UN ESCUDO NATURAL

El ozono es un gas formado por moléculas integradas por tres átomos de oxígeno (O_3) cuya inhalación es perjudicial para la salud por tener efectos tóxicos. Paradójicamente, sin él, la vida en la Tierra habría tenido serios problemas para proliferar y evolucionar. La altitud a la que se halle el ozono determina si nos beneficia o nos perjudica (figura 3).

El ozono se encuentra concentrado de manera natural en la estratosfera, en una proporción de tan solo cuatro moléculas de ozono por cada diez millones de moléculas de aire. Tiene la propiedad de absorber la radiación ultravioleta, actuando como un escudo y protegiendo así las capas inferiores de la atmósfera terrestre. Asimismo, absorbe y emite radiación infrarroja a la atmósfera, contribuyendo a su calentamiento, motivo por el cual el ozono desempeña un papel esencial también en la estructura térmica atmosférica y, con ello, en el equilibrio energético del planeta. Esos son los motivos por los que es importante realizar observaciones por satélite de su distribución global.

La capa de ozono, cuya concentración se mide en unidades Dobson, siendo 300 de esas unidades el valor normal, se mantiene en un equilibrio muy delicado, y depende de una serie de reacciones fotoquímicas que tienen lugar entre el oxígeno, óxidos de nitrógeno e hidrógeno, y óxidos halogenados. Durante muchos años, la civilización humana estuvo emitiendo, sin limitaciones, grandes cantidades de productos halogenados a la atmósfera, entre ellos los tristemente célebres clorofluorocarbonos (o CFC), contribuyendo a que ese delicado equilibrio se rompiera. Como consecuencia, las cantidades de ozono en la atmósfera disminuyeron considerablemente, hasta el extremo de que en regiones antárticas sus niveles han alcanzado valores bajísimos, sobre todo entre los meses de agosto y octubre, dando lugar al popularmente denominado *agujero* (una región cuya concentración de ozono se sitúa en torno a 100 unidades Dobson), por el que penetra la radiación ultravioleta con mayor facilidad, alcanzando los niveles inferiores de la atmósfera. El Protocolo de Montreal de 1987 impuso limitaciones que han evitado un desas-



tre peor, pero todavía hoy perdura el efecto nocivo de aquellas emisiones masivas y habrá problemas durante bastantes años.

Los primeros satélites que proporcionaron datos sobre la distribución global del ozono en la estratosfera fueron los Nimbus 4

MISIONES DE ESTUDIO DEL OZONO					
Misión	País	Fecha de lanzamiento	Órbita	Instrumento	Estado
Nimbus 3	EE. UU.	14/04/1969	Polar heliosincrónica	BUV	Finalizada el 22/01/1972
Nimbus 4	EE. UU.	08/04/1970	Polar heliosincrónica	BUV	Finalizada el 30/09/1980
Nimbus 6	EE. UU.	12/06/1975	Polar heliosincrónica	LRIR	Finalizada el 29/03/1983
Nimbus 7	EE. UU.	24/10/1978	Polar heliosincrónica	TOMS, SBUV	Finalizada el 14/02/1995
NOAA 9	EE. UU.	12/12/1984	Polar heliosincrónica	SBUV/2	Finalizada el 13/02/1998
NOAA 11	EE. UU.	24/09/1988	Polar heliosincrónica	SBUV/2	Finalizada el 16/06/2004
Meteor 3-5	Rusia	15/08/1991	Polar heliosincrónica	TOMS (origen: EE. UU.)	Finalizada el 27/12/1994
UARS	EE. UU.	12/09/1991	Baja	HALOE ISAMS (origen: Reino Unido)	Finalizada el 14/12/2005
NOAA 14	EE. UU.	30/12/1994	Polar heliosincrónica	SBUV/2	Finalizada el 23/05/2007
ERS 2	Europa	21/04/1995	Polar heliosincrónica	GOME	Finalizada el 22/06/2003
Earth Probe	EE. UU.	02/07/1996	Polar heliosincrónica	TOMS	Finalizada el 02/12/2006
NOAA 16	EE. UU.	21/09/2000	Polar heliosincrónica	SBUV/2	Finalizada el 09/06/2014
Meteor 3M	Rusia	10/12/2001	Polar heliosincrónica	SAGE III (origen: EE. UU.)	Finalizada el 06/03/2006
Envisat	Europa	01/03/2002	Polar heliosincrónica	GOMOS, GOME	Finalizada el 08/04/2012
Aqua	EE. UU.	04/05/2002	Polar heliosincrónica	AIRS	Operativa
NOAA 17	EE. UU.	24/06/2002	Polar heliosincrónica	SBUV/2	Finalizada el 10/04/2013
ADEOS II	Japón	14/12/2002	Polar heliosincrónica	ILAS	Finalizada el 24/10/2003
Aura	EE. UU.	15/07/2004	Polar heliosincrónica	OMI	Operativa
NOAA 18	EE. UU.	20/05/2005	Polar heliosincrónica	SBUV/2	Operativa
MetOp A	Europa	19/10/2006	Polar heliosincrónica	GOME-2	Operativa
NOAA 19	EE. UU.	06/02/2009	Polar heliosincrónica	SBUV/2	Operativa
Suomi NPP	EE. UU.	28/10/2011	Polar heliosincrónica	OMPS	Operativa

Acrónimos y sus significados o equivalencias: AIRS: Sensor Infrarrojo Atmosférico. BUV: Retrodispersión del Ultravioleta. GOME: Experimento para el Seguimiento del Ozono Global. GOMOS: Seguimiento del Ozono Total a partir de la Ocultación de Estrellas. HALOE: Experimento de Ocultación de Halógenos. ILAS: Espectrómetro Mejorado del Limbo Atmosférico. ISAMS: Sensor Mejorado Mesosférico y Estratosférico. LRIR: Radiómetro de Inversión de la Radiación del Limbo. OMI: Instrumento de Seguimiento del Ozono. OMPS: Conjunto para el Perfil y Cartografía del Ozono. SAGE: Experimento de Gas y Aerosoles Estratosféricos. SBUV: Retrodispersión del Ultravioleta Solar. TOMS: Espectrómetro de Cartografía Total del Ozono.

y Nimbus 7. El primero de ellos, lanzado el 8 de abril de 1970, portaba un instrumento llamado BUV (siglas, en inglés, de Retrodispersión del Ultravioleta), un espectrómetro que supuso toda una revolución en la obtención de datos de las capas altas de la atmósfera. Entre 1970 y 1972, el Nimbus 4 determinó que los niveles de ozono atmosféricos eran la mitad de lo esperado. El Nimbus 7, que despegó el 24 de octubre de 1978, estaba dotado de

No hay nada nuevo bajo el Sol, pero cuántas cosas viejas hay que no conocemos.

AMBROSE BIERCE

dos espectrómetros llamados SBUV (versión más sofisticada que el BUV) y TOMS (para el cartografiado del ozono total de la atmósfera). Este último, asimismo, portaba radiómetros y sensores basados en los instalados en el Nimbus 6, lanzado el 12 de junio de 1975. La combinación de datos obtenidos por estos dos últimos satélites permitió determinar, además de la distribución global del ozono, la de compuestos como el vapor de agua, el dióxido de nitrógeno, el ácido nítrico, el óxido nitroso y el metano.

El Satélite para la Investigación de la Atmósfera Superior (UARS; véase la imagen de la pág. 67), lanzado por la NASA durante la misión STS-48 del transbordador espacial Discovery en septiembre de 1991, fue otro ingenio que continuó estudiando la capa de ozono y los compuestos químicos hallados en la misma que afectan a su equilibrio. El UARS confirmó las teorías sobre la destrucción del ozono al elaborar mapas tridimensionales de este y del monóxido de cloro en torno al polo sur terrestre. Ese mismo año, y como se mencionó en el capítulo 2, el satélite soviético Meteor 3-5 fue lanzado con el instrumento estadounidense TOMS, similar al portado por el Nimbus 7, con el propósito de seguir realizando mediciones del ozono total presente en la atmósfera terrestre. Rusia continuó recopilando datos a este respecto con el Meteor 3M, lanzado en 2001.

Otras potencias como la Unión Europea y Japón también han puesto en marcha misiones para el estudio de la capa de ozono. Así, la ESA lanzó en 2002 la misión Envisat (acrónimo de Satélite Medioambiental) que, además de la observación del ozono, realizó el seguimiento de los cambios registrados en el clima y

el medioambiente terrestre durante casi diez años. En marzo de 2011, el satélite europeo registró una bajada sin precedentes de los niveles de ozono sobre el sector euroatlántico del hemisferio norte. Nueve meses después del lanzamiento del Envisat, Japón puso en órbita la misión ADEOS II (conocida también como Midori II), con una batería de instrumentos que, aparte del ozono, realizó también mediciones del equilibrio térmico de la Tierra, las nubes, el viento y el hielo.

OCEANOGRÁFÍA ESPACIAL

El planeta Tierra es un astro muy singular, entre otras cosas porque un 70% de su superficie se encuentra bañada por mares y océanos, con una profundidad media que se sitúa en torno a los 3,6 km. El volumen que ocupan supone el 96% de la cantidad total de agua existente en el planeta.

Se mencionó en el apartado anterior la importancia que tanto la atmósfera como los océanos tienen en el mecanismo de regulación de la temperatura de la Tierra, distribuyendo el calor recibido del Sol en las zonas ecuatorial y tropicales hasta latitudes próximas a los polos. Los océanos controlan la meteorología del planeta dado que calientan, refrigeran, humedecen y secan el aire de la atmósfera, afectando, por tanto, a la dirección y velocidad de los vientos. Los mares y océanos, además, son una notable fuente de absorción de uno de los gases de efecto invernadero más importantes, el dióxido de carbono. Dicha importancia es el motivo por el que, además de existir satélites que cuentan entre sus funciones con instrumentos para la obtención de datos oceánicos, se han diseñado misiones que, de manera específica, tienen como objetivo la observación de los océanos desde el espacio, realizando el seguimiento de aquellos fenómenos que tienen lugar en ellos.

El 10 de agosto de 1992 se lanzó desde el Puerto Espacial Europeo de Kourou (Guayana Francesa) el satélite TOPEX/Poseidon. Se trataba de una misión conjunta entre la NASA y el CNES, iniciada con el objetivo de realizar un seguimiento de la circulación



Despliegue del satélite UARS durante la misión STS-48 del transbordador espacial Discovery, llevada a cabo en septiembre de 1991.

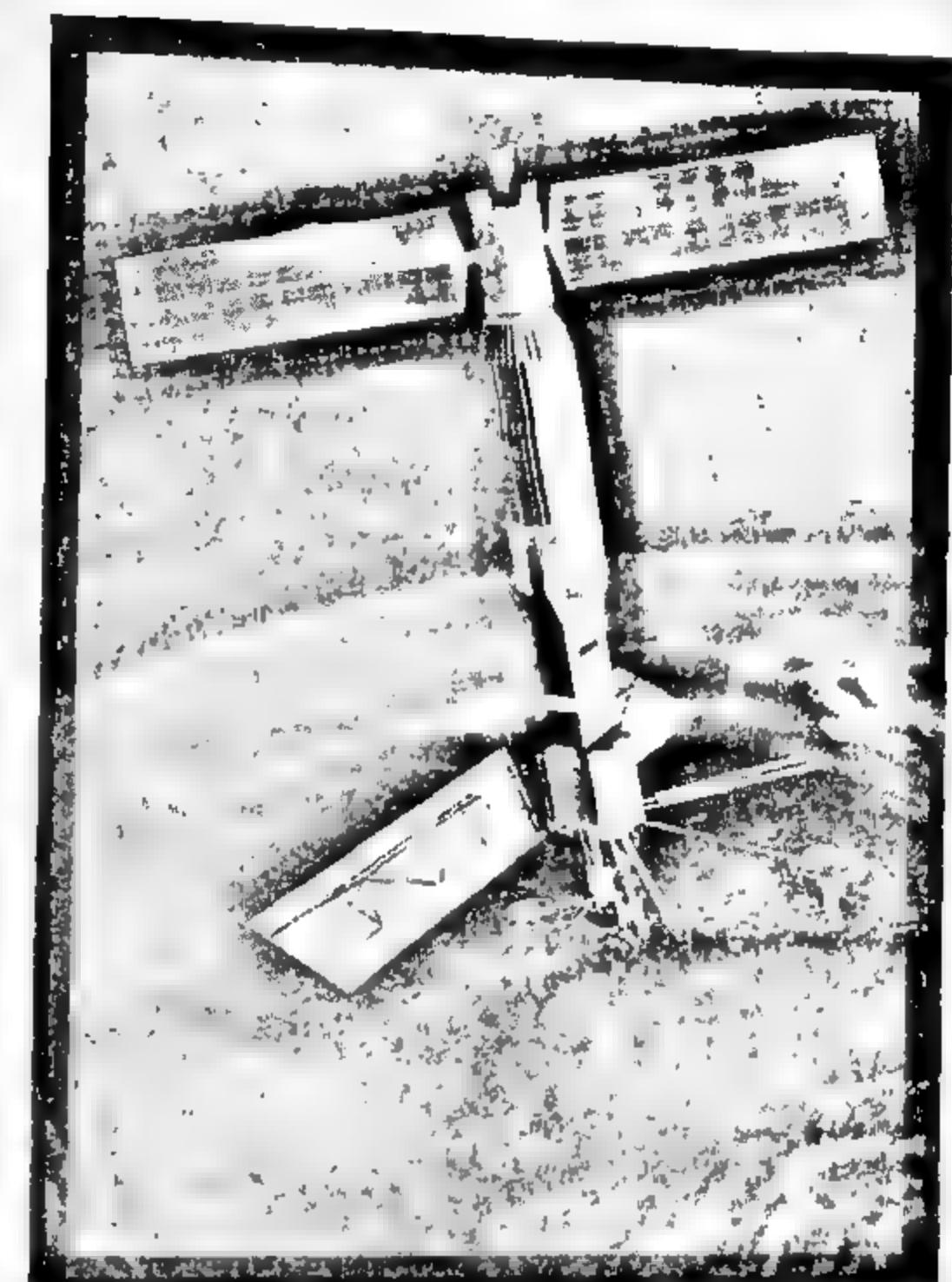
SATÉLITES ENTRE CUYOS OBJETIVOS SE ENCUENTRA LA OBSERVACIÓN OCEÁNICA

Misión	Organismos participantes	Fecha de lanzamiento	Lugar de lanzamiento	Tipo de órbita	Estado
Seasat	NASA, JPL	27/06/1978	Base Vandenberg (EE. UU.)	Polar heliosincrónica	Finalizada el 10/10/1978
TOPEX/Poseidon	NASA, CNES	10/08/1992	C.E. Kourou (Guayana Fr.)	Terrestre baja	Finalizada el 09/10/2005
Radarsat 1	CSA, NASA	04/11/1995	Base Vandenberg (EE. UU.)	Polar heliosincrónica	Operativa
Oceansat 1	ISRO	26/05/1999	C.E. Satish Dhawan (India)	Polar heliosincrónica	Finalizada el 08/08/2010
QuikScat	NASA, JPL	19/06/1999	Base Vandenberg (EE. UU.)	Polar heliosincrónica	Operativa
Terra	NASA, METI, CSA	18/12/1999	Base Vandenberg (EE. UU.)	Polar heliosincrónica	Operativa
Jason 1	NASA, CNES	07/12/2001	Base Vandenberg (EE. UU.)	Terrestre baja	Finalizada el 03/07/2013
Envisat	ESA	01/03/2002	C.E. Kourou (Guayana Fr.)	Polar heliosincrónica	Finalizada el 08/04/2012
Aqua	NASA, NASDA, INPE	04/05/2002	Base Vandenberg (EE. UU.)	Polar heliosincrónica	Operativa
ADEOS II	JAXA, NASA, CNES	14/12/2002	C.E. Tanegashima (Japón)	Polar heliosincrónica	Finalizada el 24/10/2003
TerraSAR-X	DLR	15/06/2007	Cosmódromo de Baikonur (Kazajistán)	Polar heliosincrónica	Operativa
Jason 2	NOAA, NASA, JPL, CNES, EUMETSAT	20/06/2008	Base Vandenberg (EE. UU.)	Terrestre baja	Operativa
GOCE	ESA, ONERA	17/03/2009	Cosmódromo de Plesetsk (Rusia)	Polar heliosincrónica	Finalizada el 21/10/2013
Oceansat 2	ISRO	23/09/2009	C.E. Satish Dhawan (India)	Polar heliosincrónica	Operativa
SMOS	ESA, CNES, CDTI	02/11/2009	Cosmódromo de Plesetsk (Rusia)	Polar heliosincrónica	Operativa
CryoSat 2	ESA	08/04/2010	Cosmódromo de Baikonur (Kazajistán)	Polar heliosincrónica	Operativa
TanDEM-X	DLR	21/06/2010	Cosmódromo de Baikonur (Kazajistán)	Polar heliosincrónica	Operativa
Suomi NPP	NASA, NOAA, DoD	28/10/2011	Base Vandenberg (EE. UU.)	Polar heliosincrónica	Operativa
Sentinel 1A	ESA, EUMETSAT, CNES	03/04/2014	C.E. Kourou (Guayana Fr.)	Polar heliosincrónica	Operativa
Sentinel 2A	ESA, EUMETSAT, CNES	23/06/2015	C.E Kourou (Guayana Fr.)	Polar heliosincrónica	Operativa
Jason 3	NOAA, NASA, JPL, CNES, EUMETSAT	17/01/2016	Base Vandenberg (EE. UU.)	Terrestre baja	Operativa
Sentinel 3A	ESA, EUMETSAT, CNES	16/02/2016	Cosmódromo de Plesetsk (Rusia)	Polar heliosincrónica	Operativa
Sentinel 1B	ESA, EUMETSAT, CNES	25/04/2016	C.E. Kourou (Guayana Fr.)	Polar heliosincrónica	Operativa

Acronimos y sus significados o equivalencias: CDTI: Centro para el Desarrollo Tecnológico e Industrial (España). C.E.: centro espacial. CNES: Centro Nacional de Estudios Espaciales (Francia). CSA: Agencia Espacial Canadiense. DLR: Centro Aeroespacial Alemán. DoD: Departamento de Defensa (EE. UU.). ISRO: Organización India de Investigación Espacial. NASA: Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio (EE. UU.). NASDA: Agencia Nacional para el Desarrollo Aeroespacial (Japón, hoy conocida como Agencia Japonesa de Exploración Aeroespacial, JAXA). ESA: Agencia Espacial Europea. NOAA: Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (EE. UU.). INPE: Instituto Nacional de Investigaciones Espaciales (Brasil). JPL: Laboratorio de Propulsión a Chorro (EE. UU.). EUMETSAT: Organización Europea para la Explotación de Satélites Meteorológicos. METI: Ministerio de Economía, Comercio e Industria (Japón). ONERA: Oficina Nacional de Estudios e Investigaciones Aeroespaciales (Francia).

EL ENIGMA DE LAS MAREAS

Desde tiempos de los antiguos griegos, las mareas oceánicas y su predicción han sido objeto de fascinación para los científicos hasta bien entrado el siglo xx. La primera explicación a este respecto llegó en el siglo xvii de la mano del físico y matemático Isaac Newton, quien describió las mareas como un efecto producido por la fuerza gravitatoria que la Luna y el Sol ejercen sobre nuestro planeta. Otros científicos como Pierre-Simon Laplace y Charles Darwin también realizaron investigaciones para dar respuesta a las mareas y a su comportamiento. El primero de ellos concluyó que este fenómeno era producto de la dinámica oceánica, desarrollando una ecuación a la que no pudo dar una solución analítica, dado que dependía de la forma y batimetría de las cuencas oceánicas. Por su parte, y basándose en el método empírico, Darwin fue capaz de realizar predicciones sobre las mareas con cierta precisión. No obstante, todo cambió con la llegada de la Era Espacial.



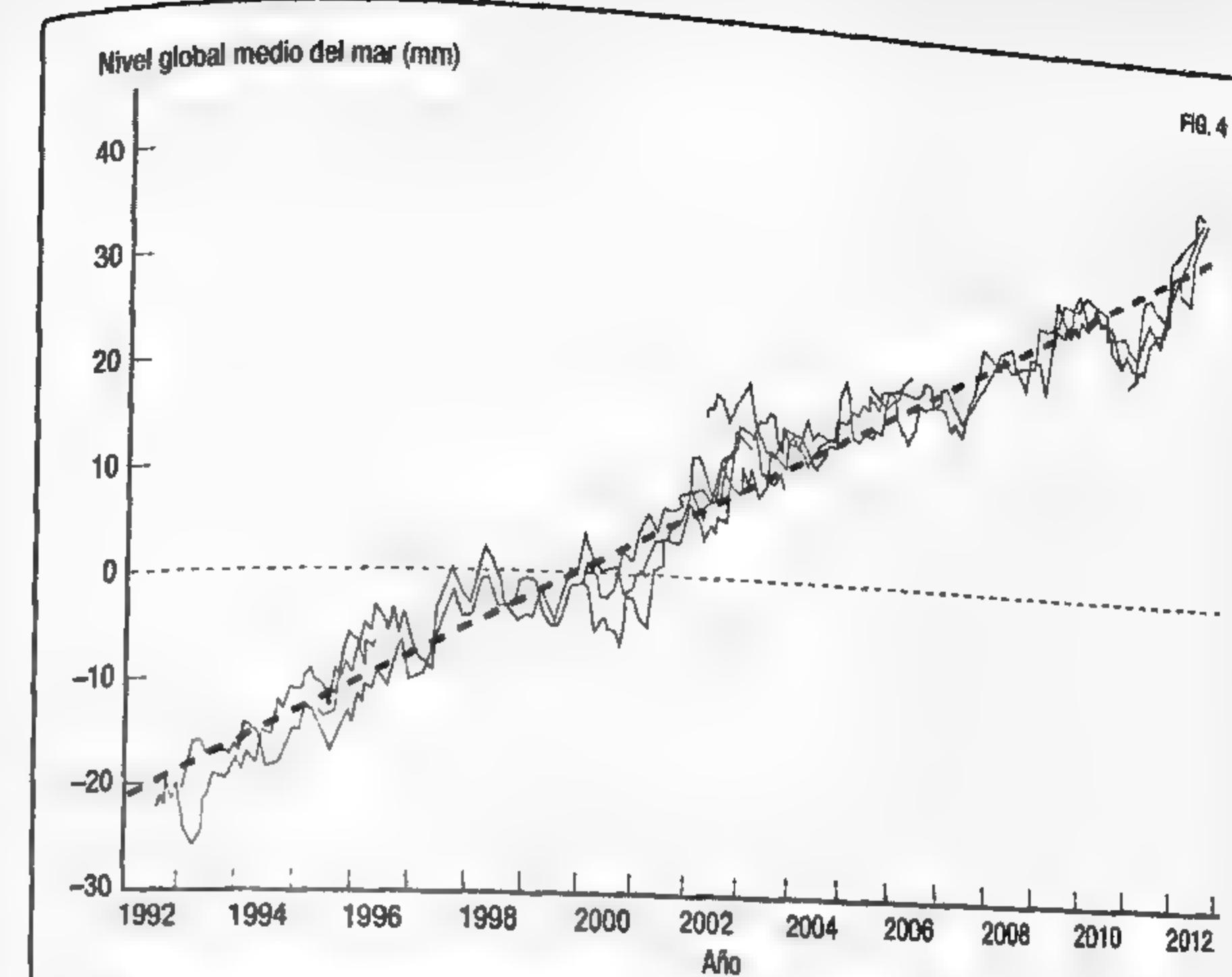
Recreación artística del Seasat en el espacio.

Los satélites: instrumentos esenciales

El lanzamiento del Seasat en 1978 puso de manifiesto que los altímetros instalados a bordo de los satélites constituyan la herramienta perfecta para la obtención de datos precisos que dieran respuesta al comportamiento de las mareas y poder predecirlas con exactitud. A partir de los datos de altimetría y la elaboración de modelos, en la actualidad es posible predecir las mareas oceánicas a escala global, no solo a nivel de superficie sino también a grandes profundidades, con una precisión que oscila entre los 2 y los 4 cm. Las predicciones pueden realizarse para períodos de meses e incluso de años. Esta información es de gran valor para diversos sectores, especialmente el naviero, dado que se antoja crucial a la hora de diseñar rutas de transporte marítimo.

oceánica a nivel global para emplear los datos obtenidos en la mejora de las predicciones del clima mundial, además de monitorizar los fenómenos oceánicos conocidos como El Niño y La Niña, esto es, el aumento y disminución de la temperatura en regiones ecuatoriales del Pacífico, respectivamente, influyendo en el movimiento del aire y en el índice de humedad de la atmósfera, y fomentando que se produzcan períodos de intensas sequías y precipitaciones en diferentes partes del globo. Gracias a sus instrumentos de gran sensibilidad, entre ellos un altímetro, este ingenio confeccionó mapas topográficos de los océanos, con una precisión tal que podía advertir variaciones en la superficie marina de tan solo 4,2 cm, lo que le permitió percibir las crestas y valles que existen en ella. A partir de los datos obtenidos por el satélite, los científicos pudieron calcular la velocidad y dirección de las corrientes oceánicas a nivel mundial, lo que contribuyó a una mejor comprensión de los mecanismos de transporte hacia latitudes altas del calor recibido del Sol en las regiones próximas al ecuador. Asimismo, los datos permitieron pronosticar los efectos que El Niño tuvo durante el periodo 1997-1998.

El TOPEX/Poseidon trabajó en tandem con el Jason 1, satélite de la NASA lanzado desde la Base Vandenberg de las Fuerzas Aéreas en California (Estados Unidos) el 7 de diciembre de 2001, una misión asimismo conjunta con el CNES. Su precisión en comparación con el TOPEX/Poseidon era aún mayor, dado que era capaz de advertir diferencias en la superficie marina de tan solo 3,2 cm. Entre los objetivos cubiertos por esta misión destacan el estudio de la variabilidad oceánica en un periodo superior a los diez años, la obtención de datos relacionados con la elevación del nivel del mar a escala global (figura 4), vinculados a cambios en su temperatura y masa, y el estudio de los remolinos oceánicos y sus efectos a gran escala en la circulación oceánica y el transporte del calor. Otros satélites de la serie, llamados Jason 2 y Jason 3, lanzados el 20 de junio de 2008 y el 17 de enero de 2016, respectivamente, han tomado el relevo en la obtención de estos datos, dando continuidad a este programa de investigación oceánico, con la participación de la NASA, el JPL, la NOAA, el CNES y el EUMETSAT.



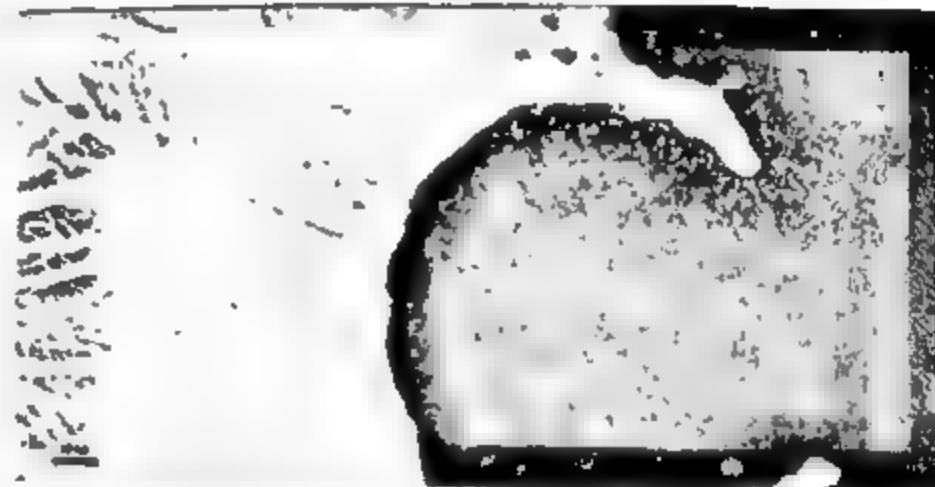
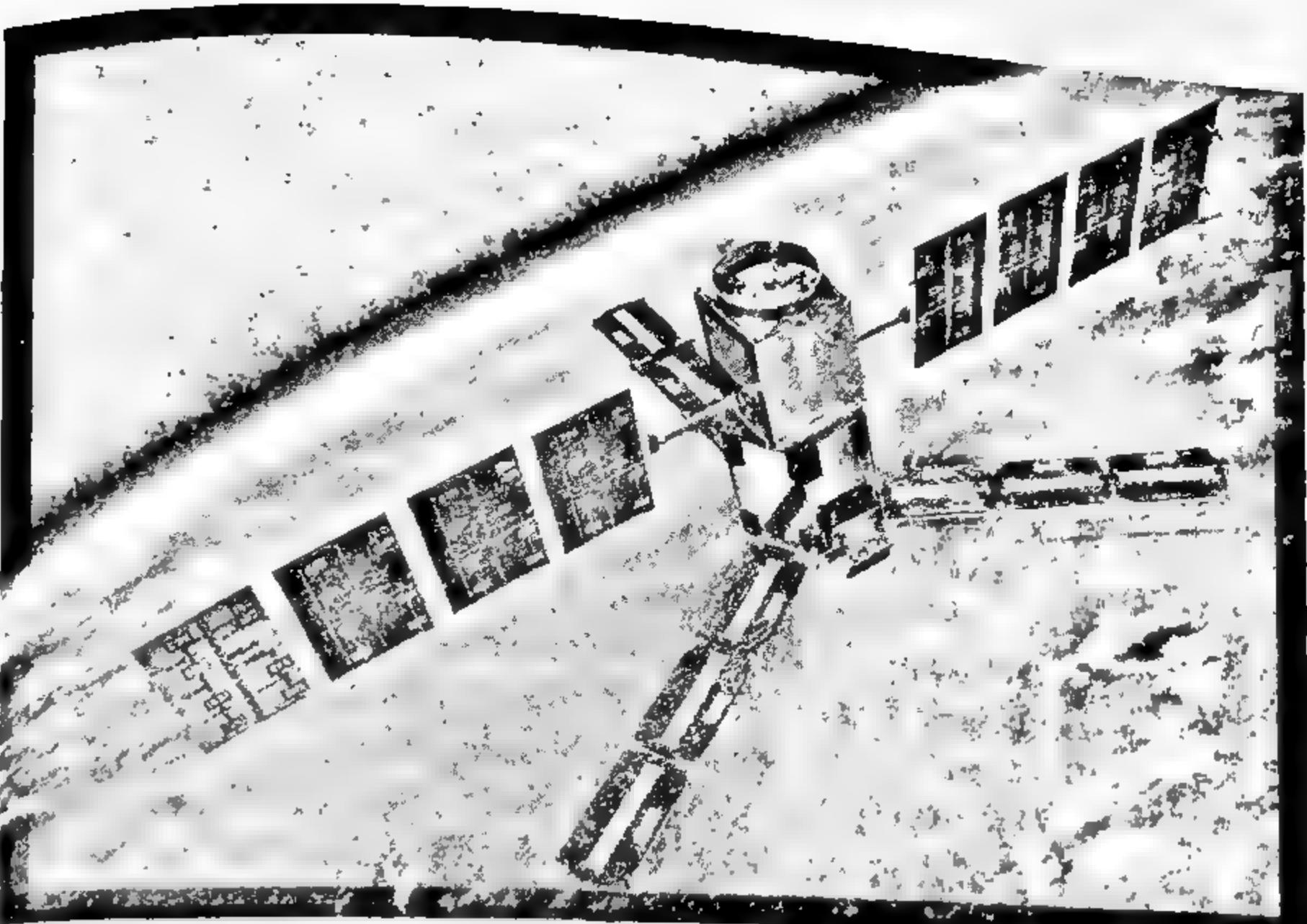
En esta gráfica, elaborada a partir de los datos obtenidos por ocho satélites, se puede apreciar una paulatina elevación del nivel del mar.

Entre 2002 y 2012, el satélite europeo Envisat transmitió a la Tierra información que permitió profundizar aún más en el conocimiento de los océanos terrestres. Su instrumento MERIS (Espectrómetro de Cartografía de Resolución Media) adquirió datos en quince franjas del espectro visible y del infrarrojo próximo, que determinaron el color del agua de los océanos, lo que permitió conocer la concentración de *clorofila* en ellos, una información esencial para comprender cómo se desarrolla el ciclo del carbono a nivel oceánico. Por su parte, el instrumento AATSR (Radiómetro de Exploración y Barrido Avanzado) midió los diferentes niveles de temperatura registrados en el mar. Esos datos son vitales para elaborar pronósticos sobre el calentamiento del planeta a largo plazo.

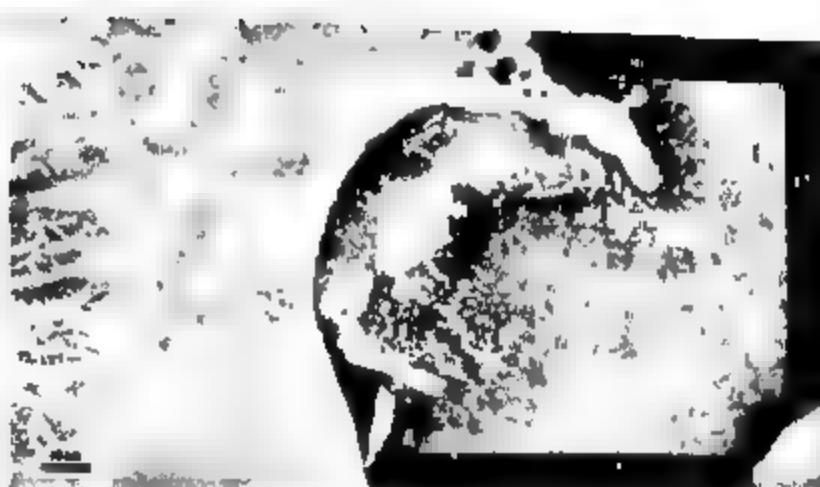
Otro ámbito de gran importancia en el campo de la oceanografía espacial es el estudio de la salinidad de los océanos, un factor clave en el sistema de regulación de la temperatura a nivel planetario. Como se ha dicho, los océanos distribuyen el calor recibido del Sol desde las zonas ecuatoriales y tropicales hacia latitudes más altas. Esa distribución depende de las corrientes marinas, cuyo funcionamiento se basa, entre otros factores, en la densidad del agua. Un nivel óptimo de salinidad en los océanos mantiene la densidad de estos en parámetros que permiten la formación de corrientes y la distribución del calor recibido del Sol de manera efectiva. Sin embargo, una disminución de esos niveles de salinidad redundaría en una mayor densidad del agua, lo que produciría una ralentización de las corrientes o, incluso, su interrupción. En consecuencia, el mecanismo de distribución de la temperatura se vería gravemente afectado. El calor se concentraría excesivamente en las zonas ecuatoriales y tropicales del planeta, y las temperaturas descenderían notablemente por debajo de los 0 °C en las latitudes medias y altas, provocando glaciaciones. Ese es el motivo por el que varias potencias han iniciado programas para el seguimiento de la salinidad oceánica.

El 2 de noviembre de 2009 partía, desde el cosmódromo ruso de Plesetsk, la misión europea SMOS, acrónimo de Humedad del Suelo y Salinidad de los Océanos (véase la imagen superior de la página contigua). En relación con ello, y a través de sus observaciones, el satélite realiza el seguimiento en los marcos espacial y temporal de los niveles de salinidad presentes en los océanos.

Por su parte, la NASA lanzó el 10 de junio de 2011, desde la Base Vandenberg y rumbo a una órbita polar heliosincrónica, el satélite Aquarius/SAC-D (estas últimas, siglas de Satélite de Aplicaciones Científicas), un vehículo fruto de la colaboración entre la NASA y la Comisión Nacional de Actividades Espaciales (CONAE) de Argentina, con la participación de Brasil, Canadá, Francia e Italia. Este satélite tenía como objetivo, entre otros, demostrar la precisión en la realización de medidas de la salinidad oceánica desde el espacio. Su misión finalizó el 8 de junio de 2015, tras casi cuatro años de operaciones.



31 de enero de 2002



17 de febrero de 2002



23 de febrero de 2002



17 de marzo de 2002

Arriba, impresión artística del satélite SMOS en órbita terrestre. Abajo, secuencia en la que se aprecian los efectos del derretimiento, en el año 2002, de la plataforma Larsen B, en la Antártida.

LA CRIOSFERA

Se denomina *criosfera* al conjunto de masas de agua que se encuentran en estado sólido en nuestro planeta. El papel que desempeña el hielo en el clima es mucho más importante de lo que, *a priori*, se pensaba. Concentrado principalmente en los polos terrestres y constituido por agua dulce, su permanencia en forma sólida es fundamental para el establecimiento de los índices de salinidad de los océanos. Las contribuciones humanas a la aceleración del calentamiento global están poniendo en serio riesgo a la criósfera. Prueba de ello es la elevación de 3 °C de la temperatura en la Antártida en los últimos sesenta años, y la consecuente y progresiva disminución del nivel de hielo a escala mundial. Ese hielo, al pasar a estado líquido, se mezcla con el agua oceánica, contribuyendo a la desalinización de los mares, un fenómeno que podría desencadenar unos efectos climáticos catastróficos a nivel planetario.

Los satélites artificiales están desempeñando una labor sin precedentes en el estudio del hielo de la Tierra, dado que desde su privilegiada posición pueden observar lugares cuyo acceso es muy difícil o imposible desde la superficie. Los datos que obtienen a lo largo del tiempo desde el espacio nos ayudan a comprender la evolución y cambios que experimenta la criósfera y sus efectos asociados.

A principios de 2002, el satélite Terra de la NASA observó a la plataforma de hielo Larsen B, de la Antártida, fragmentándose en numerosos icebergs, en cuestión de pocas semanas (véase la página anterior). El fenómeno sorprendió a la comunidad científica por su magnitud y rapidez. Las observaciones efectuadas desde el espacio fueron fundamentales para documentar el proceso.

La misión Envisat, que, como se ha dicho, fue puesta en marcha por la ESA el 1 de marzo de 2002 y estuvo operativa hasta abril de 2012, realizó el seguimiento de las extensiones heladas en los polos. En 2010, el satélite fue testigo de cómo se desprendía un gigantesco bloque de hielo ártico del glaciar Petermann, convirtiéndose en uno de los mayores icebergs registrados en el hemisferio norte.

La pérdida de superficie helada en los polos también ha sido registrada por el satélite Aqua (término que, en latín, significa «agua»), lanzado por la NASA dos meses después del Envisat. Se trata de una misión realizada en colaboración con la entonces Agencia Nacional de Desarrollo Aeroespacial de Japón (NASDA, hoy conocida como Agencia Japonesa de Exploración Aeroespacial, JAXA) y el brasileño Instituto Nacional de Investigaciones Espaciales (INPE). La del Aqua es una de las misiones internacionales más importantes emprendidas hasta la fecha con el objetivo de estudiar el ciclo del agua en nuestro planeta y realizar el seguimiento de esta en todas sus formas (sólida, líquida y gaseosa). Las observaciones en el ámbito de la criósfera se centran en el hielo, tanto oceánico como el localizado sobre la superficie terrestre, y la cubierta de nieve global, realizando un especial seguimiento de la paulatina reducción de la masa de hielo situada en regiones próximas al polo norte.

El 13 de enero de 2003, la NASA puso en órbita un nuevo satélite destinado a la observación de la criósfera. Se trataba del ICESat (acrónimo de Satélite para el estudio de la Elevación de la Tierra, las Nubes y el Hielo). Durante una década, este ingenio realizó, entre otras funciones, la medición del grosor del hielo existente sobre Groenlandia y la Antártida, una labor que tuvo su continuidad con la misión CryoSat de la ESA, lanzada en 2010, y actualmente operativa. La precisión de sus instrumentos es tal que es capaz de advertir cambios, a escala centimétrica, del grosor del hielo existente sobre las dos regiones anteriormente citadas, así como del que flota en los océanos. La ESA está empleando también su satélite SMOS, destinado principalmente a la medición de la salinidad oceánica, para detectar el hielo marino de menor espesor. En combinación con los datos obtenidos por el CryoSat, los científicos podrán determinar de una forma más detallada los cambios registrados en el hielo del Ártico.

¿Cómo sabéis que la Tierra no es el infierno de otro planeta?

Aldous Huxley

La huella humana desde el espacio

Pequeños en tamaño comparados con el planeta, pero en un número que se cuenta por miles de millones, los seres humanos llevamos milenios dejando nuestras huellas en la Tierra. Campos agrícolas, núcleos de población e incluso edificaciones son claramente perceptibles desde el espacio exterior.

Como se ha visto hasta ahora, desde la órbita terrestre podemos advertir cómo se desencadenan los diferentes fenómenos meteorológicos, y su estudio a largo plazo y a gran escala nos proporciona la información necesaria para determinar el clima que predomina en esta nave espacial que llamamos Tierra, el único hogar del que, por el momento, disponemos para poder vivir. Desde ese mirador privilegiado podemos contemplar asimismo la huella que nosotros, como civilización, dejamos en el planeta. Esa huella es una fuente de información que nos define como especie, poniendo de manifiesto las maravillas y atrocidades que el ser humano es capaz de cometer a escala planetaria.

Los últimos estudios realizados a nivel global han determinado que la especie humana ha influido en un 83% de la superficie total de nuestro planeta o, lo que es lo mismo, cuatro quintas partes del globo terrestre. Hasta un 98% del territorio apto para el cultivo de cereales, como el arroz, el maíz y el trigo, ha sufrido el impacto directo de la acción humana. Esos estudios han tenido en cuenta factores como las explotaciones agrícolas y ganaderas, el establecimiento de vías de transporte como autopistas y líneas de ferrocarril, el crecimiento de los núcleos de

población y, con estos últimos, la emisión de contaminantes a la atmósfera, entre ellos uno relativamente poco conocido: la luz. Parajes antaño sin más luz nocturna que la natural, donde astrónomos aficionados y parejas enamoradas disfrutaban del firmamento al caer la noche, han sido invadidos no solo por malos humos sino también por un excesivo y mal diseñado alumbrado público, siendo ya imposible atisbar las maravillas que ofrece el cielo nocturno.

Antes de la Era Espacial no existía forma alguna de determinar, a escala global, la huella que el ser humano está dejando sobre nuestro planeta. Los satélites han desempeñado y desempeñan un papel esencial en su seguimiento, constituyéndose como herramientas ideales que ponen de manifiesto hasta qué niveles nuestra actividad como civilización está influyendo en el ecosistema planetario.

DESDE PUEBLOS A GRANDES URBES

En la actualidad, la superficie total ocupada por núcleos de población no llega siquiera al 2% del planeta. Sin embargo, más de la mitad de la población mundial (unos 3 300 millones de seres humanos) reside en pueblos y ciudades, siendo estas últimas las que concentran hasta un 70% de la actividad económica mundial.

Conocidos previamente a su lanzamiento por la denominación ERTS (acrónimo de Satélite Tecnológico para Recursos de la Tierra), los satélites Landsat son producto de la colaboración entre la NASA y el Servicio de Reconocimiento Geológico de Estados Unidos (USGS), y comenzaron a poblar la órbita de nuestro planeta a partir del 23 de julio de 1972, fecha en la que el primero de la serie, Landsat 1, fue lanzado desde la Base Vandenberg de las Fuerzas Aéreas en California (Estados Unidos). Desde una órbita polar heliosincrónica, estos satélites, de los que hasta el momento se han lanzado ocho, dos de ellos actualmente operativos, están dotados de varios sensores y tienen la misión de captar imágenes multiespectrales de la superficie terrestre de manera reiterada, al objeto de advertir cambios en sus rasgos.

Sus datos constituyen una fuente muy valiosa de información en diversos ámbitos, entre ellos el urbano, dado que contribuyen a evaluar la expansión que las ciudades experimentan con el transcurso del tiempo. En las últimas décadas, el crecimiento de las ciudades ha sido muy intenso, con contadas excepciones, y los datos suministrados por estos satélites durante más de cuarenta años permiten no solo realizar un seguimiento del ritmo y forma en que evolucionan los núcleos urbanos, sino también determinar las diferencias existentes en los patrones de expansión de las ciudades, dependiendo de su ubicación geográfica y/o nivel de desarrollo.

Basándose en las imágenes de 25 ciudades de tamaño medio a lo largo y ancho del globo tomadas por los instrumentos Thematic Mapper (TM, Landsat 4 y 5) y Enhanced Thematic Mapper (ETM, Landsat 6 y 7), los investigadores A. Schneider y C.E. Woodcock han establecido una taxonomía urbana constituida por cuatro tipos de ciudades, representadas por las urbes de Varsovia (Polonia), Bangalore (India), Washington DC (Estados Unidos) y Cantón (China). En el primer tipo (Varsovia) se engloban aquellas ciudades con una tasa de crecimiento lento. El segundo de ellos (Bangalore) aglutina ciudades de crecimiento rápido y desarrollo fragmentado. Las ciudades como Washington DC, pertenecientes al tercer grupo, se caracterizan por experimentar un crecimiento expansivo y una gran dispersión con densidades bajas de población. El cuarto y último tipo (Cantón) comprende aquellas ciudades que muestran unas tasas extraordinariamente altas de crecimiento con densidades de población altas.

Al caer la noche

Las imágenes nocturnas tomadas desde la órbita terrestre nos proporcionan un gran volumen de información (véase la ima-

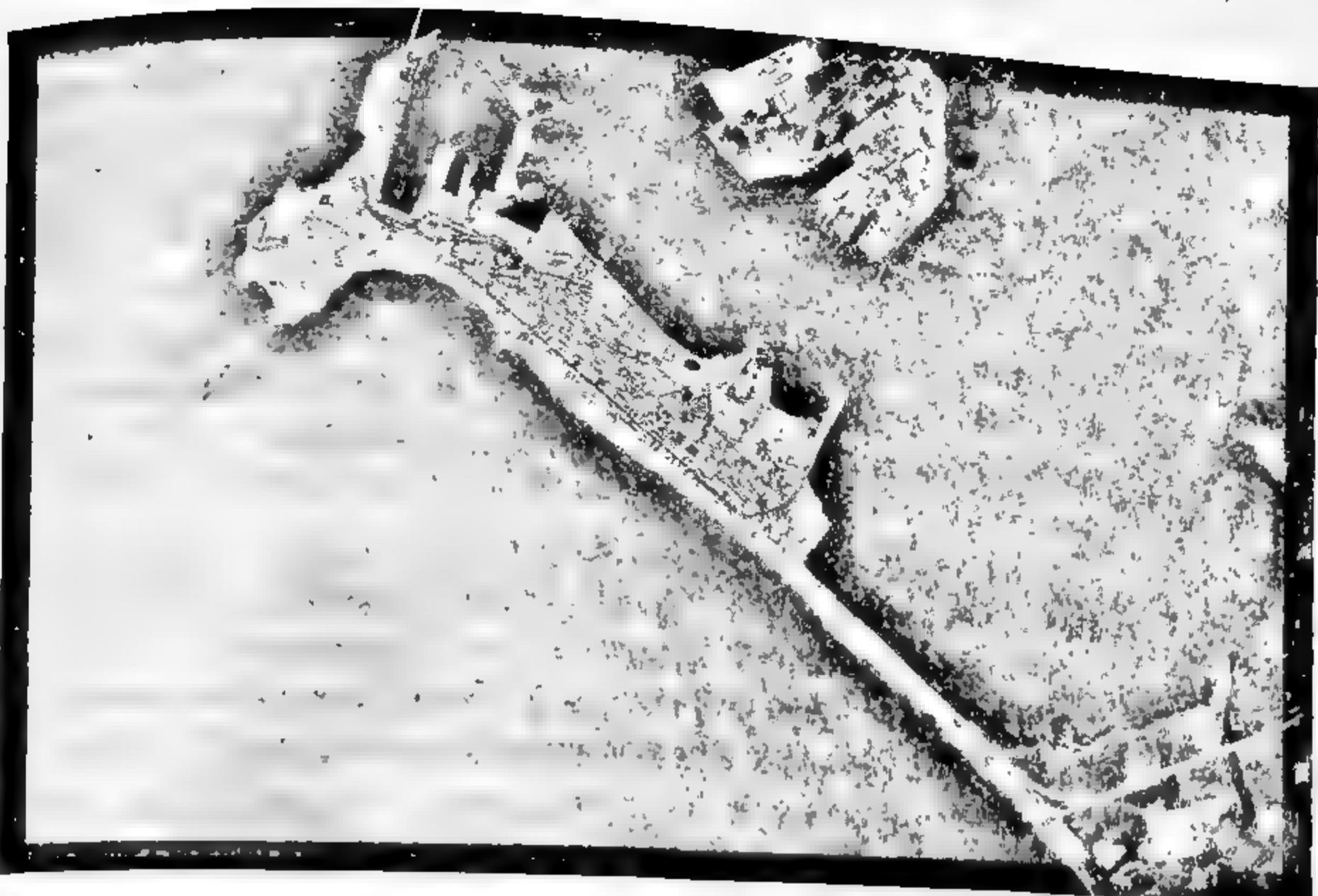
Tenemos generaciones enteras de personas que nunca han visto la Vía Láctea en el cielo nocturno, una parte esencial de nuestra conexión con el cosmos.

CHRIS ELVIDGE

gen inferior de la página contigua). Son estas, precisamente, las que ponen de manifiesto cuánta cantidad de energía se desaprovecha en la iluminación de las ciudades, cuya luz, de manera mayoritaria, es proyectada hacia la atmósfera terrestre dando lugar a la contaminación lumínica, un fenómeno que va más allá de lo meramente estético al provocar serios problemas en el ecosistema y en la gestión de recursos terrestres, y contra la cual llevan años luchando colectivos científicos y ecologistas.

Las medidas realizadas por el satélite estadounidense Suomi, lanzado al espacio el 28 de octubre de 2011, han servido para determinar que la contaminación lumínica, fenómeno al que no hace mucho tiempo no se le prestaba la más mínima atención, se ha convertido en una de las formas de polución más penetrante y capaz de alterar el medioambiente. En junio de 2016, y gracias a los datos del referido satélite, un equipo de científicos estadounidenses e italianos confeccionaron el mapa más preciso de la contaminación lumínica realizado hasta la fecha, a partir del cual se ha podido averiguar que nuestra galaxia, la Vía Láctea, que domina nuestro firmamento desde hace eones, se ha convertido en un vago recuerdo para una tercera parte de la población mundial.

Observando el mapa confeccionado con los datos del Suomi, no encontraremos dificultad alguna para advertir los contornos de algunos continentes y las ubicaciones de las principales ciudades del mundo. Dado que aún no se han implementado medidas serias para erradicar este tipo de contaminación, las emisiones de luz vistas desde el espacio nos sirven actualmente para determinar el nivel de desarrollo alcanzado por los diferentes países de la Tierra. Así, advertimos que las emisiones lumínicas en el hemisferio norte son mucho más numerosas e intensas que en el hemisferio sur, lo que evidencia las diferencias de desarrollo existentes entre ambos. De igual modo, encontramos contrastes entre países de un mismo hemisferio. Tal es el caso de Corea del Norte, un país aislado en muchos aspectos del resto del planeta, por motivos políticos de difícil comprensión, que al llegar la noche se muestra como un gran espacio de oscuridad, delimitado por las luces de sus países vecinos, Corea del Sur y



Arriba, imagen de la ciudad de Cádiz tomada por la Expedición 14 desde la Estación Espacial Internacional. Cádiz es un modelo peculiar de ciudad, cuya expansión está limitada por el mar en todos sus flancos. Ese es el motivo por el que apenas ha experimentado cambios en el último siglo. Abajo, la península ibérica y el extremo norte de África vistos de noche desde la Estación Espacial Internacional.

China. A partir del referido mapa se advierte igualmente que la contaminación lumínica se encuentra más extendida en países como Singapur, Italia, Alemania y Corea del Sur, mientras que otras naciones como Canadá y Australia disfrutan de cielos más oscuros. En Europa Occidental, pequeñas áreas de cielo nocturno, situadas en Escocia, Suecia y Noruega, permanecen inalteradas, mientras que al otro lado del Atlántico, casi la mitad del territorio estadounidense se encuentra extensamente contaminado de luz.

Como adelantábamos previamente, los efectos de la contaminación lumínica van mucho más allá de lo que, *a priori*, podríamos imaginar. Además de impedirnos observar las maravillas que muestra el cielo nocturno, este exceso de luz artificial produce perturbaciones en el ecosistema, principalmente en los insectos, las aves y las tortugas marinas, alteraciones que pueden derivar en consecuencias fatales.

Las imágenes nocturnas de la Tierra se han hecho muy populares en los últimos años, gracias a las observaciones y fotografías realizadas por los astronautas a bordo de la Estación Espacial Internacional (ISS), un complejo que orbita nuestro planeta a unos 400 km de altitud, tripulado ininterrumpidamente desde el año 2000. A lo largo de estos años, la calidad de las imágenes ha mejorado sustancialmente dado que las cámaras utilizadas son cada vez más sofisticadas. Como resultado, se obtienen en la actualidad las imágenes nocturnas de mayor definición posible desde el espacio, que, tomadas en secuencia, sirven para la elaboración de los populares *time-lapse*, es decir, conjuntos de fotografías de un mismo paisaje tomadas a ciertos intervalos de tiempo. La utilidad de estas imágenes radica en que constituyen una herramienta para estudiar factores ligados al clima urbano (principalmente la contaminación lumínica), a la respuesta ante incidencias como interrupciones en el suministro eléctrico (apagones) y a la densidad de población de las ciudades.

A partir de las luces de las ciudades observadas desde el espacio se puede determinar la distribución espacial de los asentamientos humanos a lo largo y ancho del globo. Son reconocibles determinados patrones de distribución, la mayoría de los cuales

nos indica que un importante número de núcleos de población se encuentra asentado a lo largo de las costas, en las riberas de los ríos y próximo a redes de transporte.

LOS SATÉLITES COMO MÁQUINAS DEL TIEMPO

Hasta ahora hemos visto ejemplos de la utilidad que tienen los satélites en la obtención de imágenes en tiempo real para el seguimiento de fenómenos meteorológicos y del clima. Sin embargo, los satélites también son capaces de suministrarnos datos sobre acontecimientos que tuvieron lugar centenares, e incluso miles de años atrás en el tiempo, demostrando su gran utilidad en campos como la arqueología.

La primera aplicación de la fotografía espacial con fines arqueológicos se remonta a la década de 1960. Las imágenes en los rangos tanto visible como infrarrojo del espectro tomadas por el experimento denominado técnicamente S065, e incorporado en la histórica misión lunar Apolo 11 en julio de 1969, sirvieron a Yehuda Kedar, investigador del Departamento de Geografía de la Universidad de California en Santa Bárbara, para identificar el sistema de canales antiguos Hohokam, una serie de estructuras lineales construidas en tiempos prehistóricos en el entorno de la ciudad de Phoenix, en el estado de Arizona (Estados Unidos). La utilidad de las imágenes tomadas en el rango del infrarrojo radica en que estas pueden revelar la existencia de estructuras antiguas ocultas parcial o totalmente, dado que las mismas absorben e irradian energía solar en cantidades diferentes a las emitidas y absorbidas por el entorno en el que se ubican. Desde aquel hallazgo realizado por Kedar, el número de investigaciones arqueológicas que se sirven de imágenes tomadas por satélite se cuenta por centenares.

Los satélites de la serie Landsat también han desempeñado un papel importante en el ámbito arqueológico. Sus instrumentos TM, ETM y ETM+ (este último a bordo del Landsat 7), cuyas imágenes fueron utilizadas para establecer una taxonomía urbana, como se ha mencionado con anterioridad, han sido ampliamente emplea-

dos en este campo, contribuyendo a que los científicos ganaran experiencia y confianza en el uso de datos multiespectrales para una gran variedad de aplicaciones en esta disciplina científica.

Otras herramientas de gran utilidad en las investigaciones arqueológicas (además de en otros ámbitos) son los radares. En

Una imagen en color tomada en infrarrojo, interpretada correctamente, puede guiar al arqueólogo a potenciales lugares de interés previamente inadvertidos.

GEORGE GUMERMAN Y THOMAS LYONS

A), un radar diseñado por el JPL para la NASA. Aunque el vuelo tenía una duración prevista de cinco días, debido a problemas técnicos tuvo que acortarse a dos. Sin embargo, en algo más de 48 horas de vuelo, los astronautas del Columbia pudieron realizar una cartografía del planeta que abarcó una superficie de 10 millones de km². Los datos obtenidos por el SIR-A, combinados con estudios de campo y excavaciones, permitieron el descubrimiento de la ciudad perdida de Ubar. Asimismo, las imágenes del radar detectaron la presencia, bajo las arenas de la región oriental del desierto del Sahara, de antiguos ríos por los que fluyó el agua hace miles de años, y junto a los cuales se localizaron pequeños asentamientos que datan de la última mitad del neolítico. Estos hallazgos están sirviendo para establecer una cronología sobre los asentamientos humanos en el antiguo Egipto.

Otros radares SIR volaron asimismo en misiones del transbordador. El SIR-B fue transportado al espacio por el Challenger en la misión STS-41G, realizada entre el 5 y el 13 de octubre de 1984, y el SIR-C voló a bordo del Endeavour en la misión STS-59, que tuvo lugar entre el 9 y el 20 de abril de 1994. En este vuelo, denominado SRL-1 (siglas de Laboratorio Radar Espacial 1), el SIR-C trabajó junto a un segundo radar llamado X-SAR (Radar de Apertura Sintética de banda X), generando detalladas imágenes

de lugares emblemáticos como la Gran Muralla China, captando diversos matices que distinguían dos generaciones de esta colosal construcción. Durante la misión STS 68, también realizada a bordo del Endeavour cinco meses después y conocida como SRL-2, los radares SIR-C/X-SAR obtuvieron imágenes de alto valor arqueológico, destacando las de la ciudad de Angkor (Camboya), la cual alberga más de 60 templos que datan del siglo IX de nuestra era, y de entre los que destaca su complejo principal, Angkor Wat.

Seis años después de que volara el último SIR a bordo del transbordador, la NASA puso en marcha la SRTM (acrónimo de Misión de Topografía Radar del Transbordador), realizada a bordo del Endeavour durante el vuelo STS 99, llevado a cabo entre el 11 y el 22 de febrero de 2000. Gracias a una larga antena desplegada desde la bodega de carga, los astronautas del transbordador, divididos en dos equipos, realizaron una cartografía ininterrumpida que cubría desde los 66° norte a los 56° sur. Los datos, enviados al JPL, resultaron ser de una calidad excelente, y su recopilación conformó el mapa topográfico de la Tierra más preciso logrado hasta entonces. Muchos equipos de arqueólogos emplean la información obtenida a partir de la misión SRTM para la elaboración de modelos en diversos estudios, entre ellos los ligados a la paleohidrología. Estos datos han sido igualmente útiles para localizar restos arqueológicos en Oriente Medio mediante la detección de pequeños montículos bajo los cuales se asientan antiguas edificaciones. Los datos en sí no proporcionan información sobre la existencia de tales edificaciones, por lo que deben ser combinados con imágenes por satélite tomadas, por ejemplo, en el rango del infrarrojo, dada la utilidad que tiene esta frecuencia de la luz para la localización de enclaves arqueológicos.

Un año antes de la misión SRTM, la compañía comercial GeoEye (entonces conocida como Space Imaging) lanzó el satélite IKONOS, un ingenio con una gran resolución que ofrece sus productos a diversos sectores, entre ellos el de la investigación arqueológica. En 2001, otra compañía, Digital Globe, siguió los pasos de GeoEye, lanzando su satélite Quickbird, cuyas presta-

ciones son similares a las del IKONOS (GeoEye y sus satélites fueron adquiridos en 2013 por Digital Globe). Estos vehículos son capaces de advertir sutiles cambios en el terreno, lo que facilita la localización de asentamientos antiguos, sobre todo mediante la combinación de imágenes tomadas en diferentes longitudes de onda, y datos tomados previamente por la misión SRTM.

En el ámbito arqueológico, los satélites están desempeñando una función no solo localizadora de antiguos asentamientos humanos. La información que proveen sirve asimismo para adoptar medidas de protección y conservación de tales asentamientos, algunos de los cuales se encuentran en regiones expuestas a amenazas diversas, entre ellas los expolios, los fenómenos naturales y los conflictos bélicos.

LA ESTULTICIA HUMANA PUEDE OBSERVARSE DESDE EL ESPACIO

En líneas anteriores analizamos a nuestra especie desde el espacio a través de sus asentamientos en la superficie terrestre, tanto en el presente como en el pasado. Es hora de explorar otro ámbito igualmente visible desde la órbita terrestre: los efectos de la sinrazón humana.

Es un hecho que nuestra civilización ha demostrado ser bastante tendente a solucionar los problemas de un modo beligerante en lugar de pacífico. Un ejemplo de ello son los innumerables conflictos bélicos acaecidos desde el amanecer de los tiempos, coronados por dos guerras mundiales y toda una suerte de iniciativas de fomento del terror a nivel global, basadas en conceptos tan anacrónicos como equivocados. En ese arranque de agresión y aniquilación del semejante, el ser humano también hace extensivo su poder destructivo al medioambiente, dejando oscuras huellas que seguirán siendo patentes en décadas, o incluso, en siglos próximos.

En febrero de 1991, época en la que se desarrollaban las últimas fases de la Operación Tormenta del Desierto (guerra del Golfo Pérsico), las tropas iraquíes destruyeron e incendiaron más de 700 pozos petrolíferos ubicados en territorio kuwaití.

Durante semanas, cantidades equivalentes a 5 millones de barriles de crudo y a 80 millones de metros cúbicos de gas natural ardieron diariamente durante semanas, emitiendo a la atmósfera ingentes cantidades de CO₂ y otros elementos contaminantes. Astronautas pertenecientes a seis misiones del transbordador espacial de la NASA, realizadas entre abril y noviembre de aquel año, quedaron estupefactos al contemplar las enormes columnas de humo, negras como el carbón, que emanaban de aquellos pozos y se alzaban hasta alcanzar los 5 km de altura, las cuales contrastaban con las tonalidades ocres del desierto. Su extensión era tal, que los astronautas las veían perderse en el horizonte terrestre. Los gases emitidos en aquellas columnas de humo degradaron el aire de la región durante meses, contándose entre ellos bastantes muy perjudiciales para el ecosistema, como por ejemplo dióxidos de nitrógeno y de azufre. Las partículas del humo, por acción de la gravedad, se fueron asentando sobre el terreno, convirtiendo a la región en una zona altamente contaminada e impracticable para el cultivo.

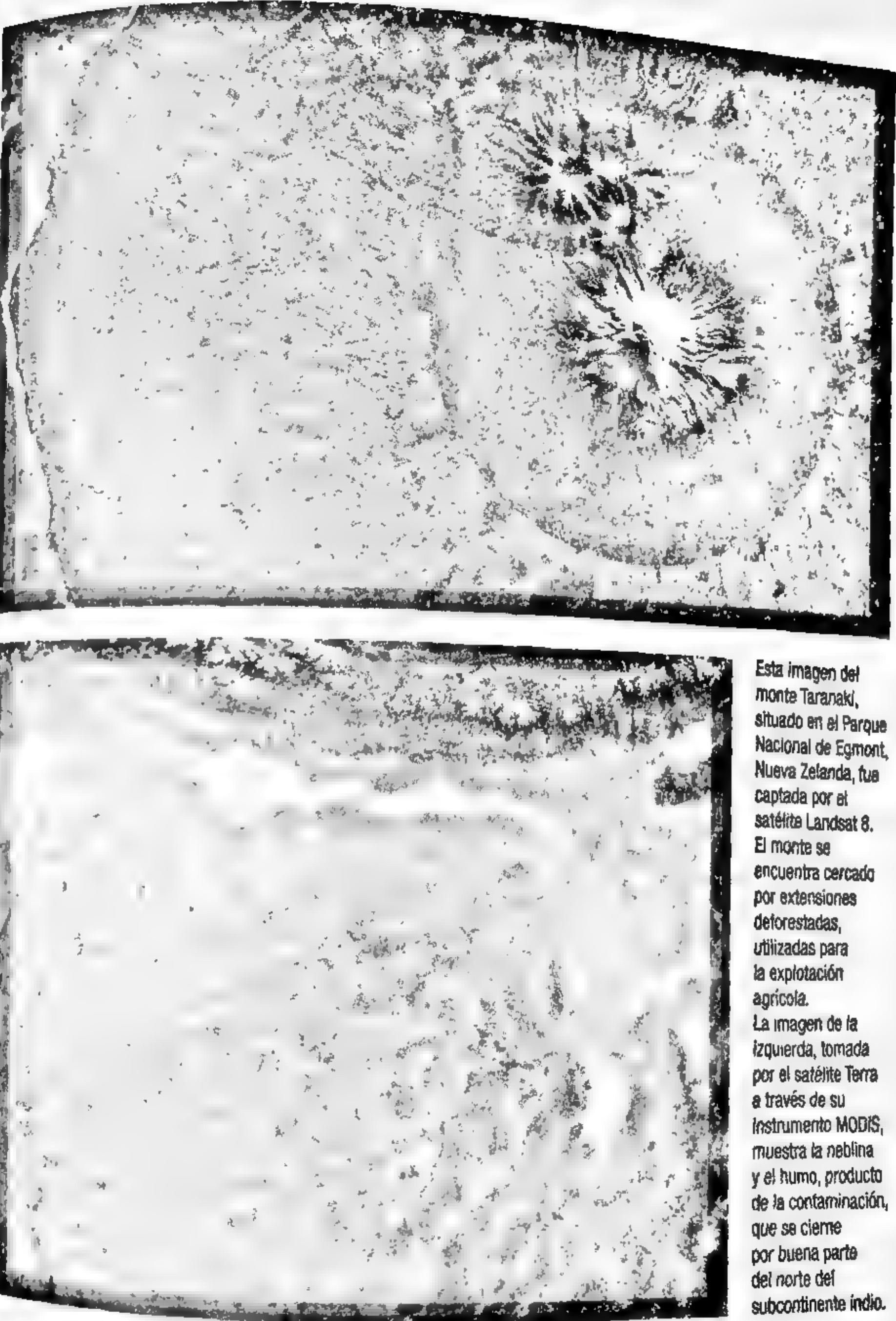
Otra huella fácilmente visible desde el espacio es la tala indiscriminada de masas forestales con propósitos diversos. Donde una vez se extendían selvas de una inigualable riqueza biológica, hoy esas tierras están dominadas por prados rasos o explotaciones agrícolas masivas que han redundado en la extinción de importantes especies vegetales y animales que nuestros hijos y nietos solo podrán contemplar en las páginas de los libros o en antiguos documentales. En ese sentido, la observación de grandes áreas desde el espacio es de gran ayuda para mantener al día el inventario de la vegetación de una región, país, continente y hasta del mundo entero. Un ejemplo de ello se muestra en la figura 1.

En julio de 2014, el satélite Landsat 8 tomó una imagen singular del entorno del monte Tarawaki, situado en el Parque Nacional de Egmont, en Nueva Zelanda (véase la imagen superior de la pág. 91), una reserva natural con una gran biodiversidad que se encuentra literalmente cercada por extensas llanuras convertidas en tierras de pasto, lo que ha transformado al monte Tarawaki en una auténtica isla dentro de su propio territorio. Los efectos de la deforestación por causas humanas pueden igual-



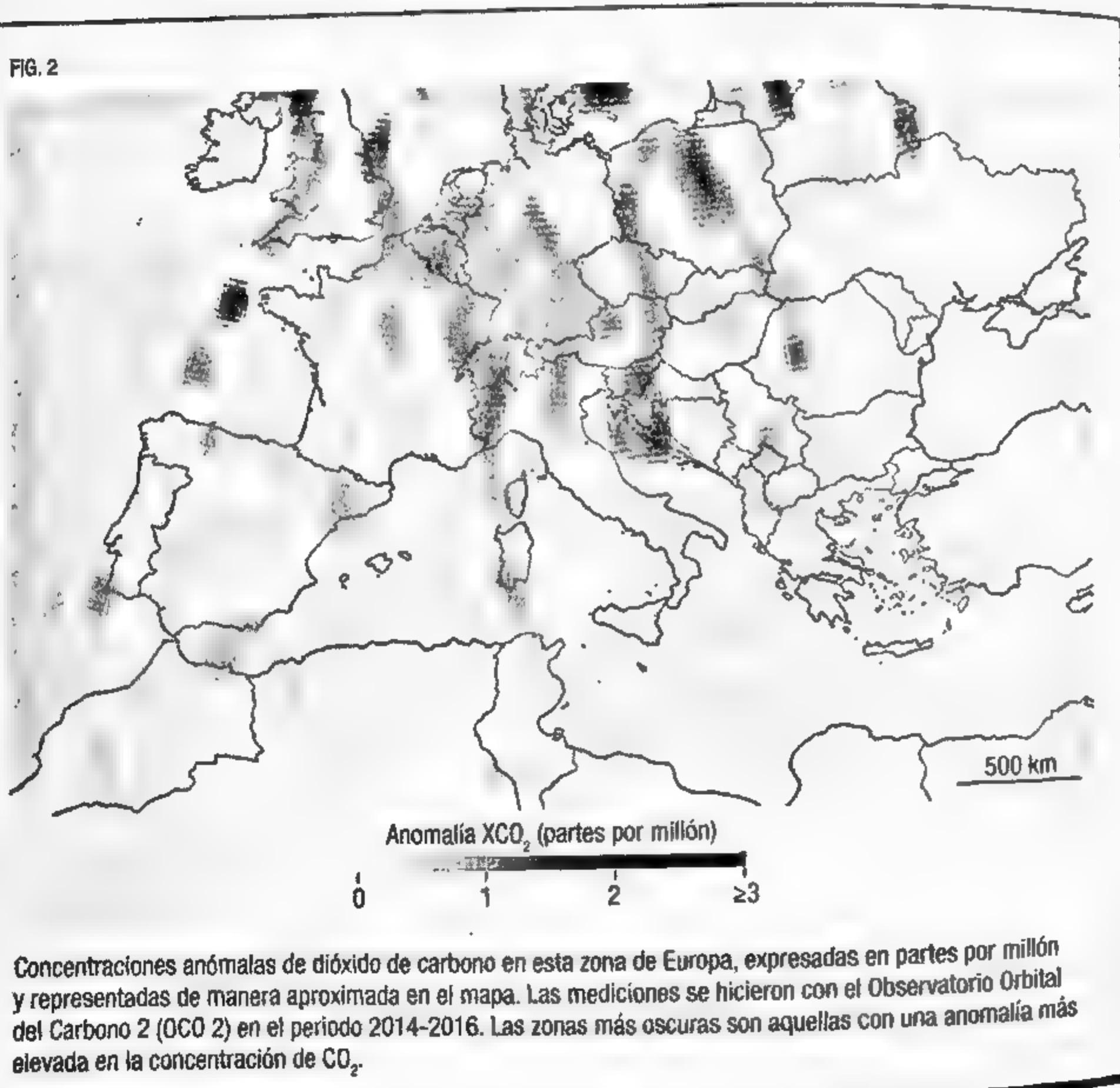
mente advertirse en la Amazonia. Imágenes tomadas por el satélite Landsat 5 entre los años 2000 y 2010 muestran extensas áreas selváticas destruidas en el estado de Rondonia, situado al oeste de Brasil. Las tonalidades verdes de aquellas zonas que aún permanecen intactas contrastan con la gama de marrones y ocres que muestran las áreas afectadas.

La deforestación, en la mayoría de las ocasiones, obedece a prácticas agrícolas no sostenibles como la plantación de palma, cuya producción es muy barata y su aceite tiene una utilización principalmente alimentaria y cosmética. Además de tener efectos nefastos en el clima mundial dado que fomenta las extinciones y la aceleración del calentamiento global, la deforestación también es una fuente de conflictos sociales que pueden derivar en enfrentamientos armados.



La emisión de ingentes cantidades de gases contaminantes a la atmósfera terrestre es otra de las huellas humanas visibles desde el espacio. Un ejemplo de ello se muestra en la figura 2. Además del CO₂, existen otros compuestos, como el dióxido de nitrógeno (NO₂) y el dióxido de azufre (SO₂), emitidos a la atmósfera como consecuencia de la combustión de madera (uno de los efectos directos de la deforestación) y la quema de combustibles fósiles como el carbón y el petróleo. Este fenómeno es particularmente visible en el entorno de países asiáticos como China e India. Un ejemplo de ello lo encontramos en las imágenes.

FIG. 2



LA GUERRA Y LOS MOVIMIENTOS MIGRATORIOS

Los conflictos bélicos, como los cambios climáticos y la falta de recursos naturales esenciales como el agua, abocan al éxodo a millones de personas. Actualmente, el continente europeo se está viendo desbordado por la llegada de un número ingente de personas que escapan del terror y de la barbarie asentados en países africanos y asiáticos, lo que genera importantes alteraciones a distintos niveles, entre ellos la seguridad. A este respecto, la Unión Europea puso en marcha la iniciativa FRONTEX, que cuenta con una infraestructura de vigilancia constante de sus fronteras continentales, especialmente las costeras.

Las fronteras desde el espacio

Los satélites desempeñan un papel esencial en el ámbito de FRONTEX. Gracias a sus sofisticados instrumentos, son capaces de detectar y realizar el seguimiento de grupos migratorios. Los vehículos del programa Sentinel, perteneciente al programa Copernicus, puesto en marcha por la ESA en colaboración con EUMETSAT y el CNES, cuya función principal es la observación de la Tierra en el marco de la meteorología, la climatología y los recursos del planeta, también están prestando servicios a FRONTEX con el objetivo de reforzar sus capacidades mediante la observación de lugares clave desde el espacio. Tales servicios de vigilancia de las fronteras entraron en su fase preoperativa en 2013, y se centran en la detección de embarcaciones, la monitorización de puertos, costas y territorios próximos a las fronteras de la Unión Europea. A pesar del poco tiempo que lleva en funcionamiento, el programa Copernicus ha contribuido ya a salvar centenares de vidas. En octubre de 2015, 350 personas fueron socorridas cuando los satélites detectaron la presencia de cuatro embarcaciones neumáticas abandonando la costa de Libia, rumbo a Europa. Las observaciones desde el espacio determinaron la localización exacta de tales embarcaciones, lo que permitió al Centro de Coordinación Internacional de FRONTEX iniciar un operativo de rescate de emergencia.

Acuerdo para la vigilancia fronteriza

El 10 de noviembre de 2015 se firmó un acuerdo de cinco años de vigencia para dotar a FRONTEX con un apoyo financiero de 48 millones de euros que permitirá el incremento de la utilización de los datos suministrados por el programa Copernicus para la vigilancia de las fronteras de la Unión Europea.

Barcas neumáticas tripuladas por inmigrantes, detectadas desde la órbita terrestre en las proximidades de la costa de Libia. Las señales son muy débiles, pero resultan delatadoras para los expertos.



Los tesoros de la Tierra

nes obtenidas el 17 de diciembre de 2004 por el satélite Terra de la NASA (véase la imagen inferior de la pág. 91). Orbitando la Tierra a unos 700 km de altitud, el satélite tomó varias imágenes

sobre territorio indio, en las que podía apreciarse una espesa niebla gris, producto de la emisión indiscriminada de contaminantes a la atmósfera, que seguía el curso del río Ganges, al norte del país.

Aunque la verdad de los hechos resplandezca, siempre se batirán los hombres en la trinchera sutil de las interpretaciones.

GREGORIO MARAÑÓN

Los estudios realizados por la Organización Mundial de la Salud apuntan a que alrededor de 2,4 millones de personas mueren anualmente a causa de la contaminación. En el caso del NO₂, que puede apreciarse claramente como una neblina de tonalidades ocres sobre las grandes urbes, puede provocar serios problemas respiratorios a personas sanas, y agravar las dolencias de aquellas que se encuentran enfermas. Además, este puede reaccionar con otras sustancias contaminantes cerca de la superficie terrestre, produciendo altos niveles de ozono en la troposfera, un gas que en la estratosfera nos protege de los rayos ultravioleta pero cuya inhalación es muy peligrosa tanto para los seres humanos como para los vegetales.

Por lo que se refiere al SO₂, este gas es inodoro y muy soluble en agua. Al mezclarse con el vapor de las nubes, da como resultado ácido sulfídrico. La precipitación sobre la superficie terrestre de esta sustancia tan corrosiva se conoce como lluvia ácida, y tiene una gran capacidad destructora sobre las masas forestales.

El papel de los satélites en el seguimiento de este tipo de fenómenos que están dañando seriamente el ecosistema global se antoja muy importante, dado que sus datos evidencian los efectos de tales actividades con una perspectiva planetaria, y son esenciales para la puesta en marcha de leyes que frenen esta degradación.

Los largos y complejos procesos que dieron origen a la Tierra, y su posición con relación al Sol, la han convertido en un astro que contiene todos los recursos necesarios para que en él florezca y se desarrolle una amplia diversidad de formas de vida. Tales recursos son limitados y precisan de una gestión que garantice su sostenibilidad.

Hace aproximadamente 4 000 millones de años, surgieron en nuestro planeta las primeras formas de vida. Desconocemos si aquellos primitivos microorganismos eran autóctonos, es decir, si tuvieron origen en la propia Tierra, o bien llegaron en meteoritos de origen asteroidal o cometario, una circunstancia contemplada en el marco de la *teoría de la panspermia*, nacida en el siglo xix y defendida por científicos como el sueco Svante Arrhenius y el británico William Thomson. Esos microorganismos, ya fueran autóctonos o extraterrestres, encontraron en nuestro planeta las condiciones idóneas para desarrollarse y evolucionar hacia formas más complejas con el transcurso de millones de años. Hasta ahora, la Tierra es el único lugar en el universo del que tenemos constancia de la existencia de vida, y en gran medida ello se debe a la riqueza que atesora nuestro planeta y al entorno espacial en que este se encuentra. Su distancia al Sol, por ejemplo, permite que el agua se encuentre presente en todas sus formas, pudiendo, por tanto, fluir en estado líquido, lo que la convierte en un perfecto «caldo de cultivo» para el desarrollo de la vida.

Unos 4 000 millones de años después, la Tierra es ahora un planeta dotado de una atmósfera respirable, de una capa de ozono

no y de un campo magnético que nos protege de las mortales radiaciones que existen en el vacío del espacio. En consecuencia, nuestro planeta se ha convertido en el hogar de una enorme biodiversidad integrada por millones de especies animales y vegetales, gracias a la existencia de tierras fértilles y al establecimiento de una cadena trófica que asegura la supervivencia de las especies. En resumen, la Tierra atesora una gran fuente de riquezas tanpreciadas como escasas en el sistema solar. Nuestro vecino Marte, en el que hace millones de años fluyó también el agua y que posiblemente albergó algún tipo de forma de vida microscópica, es en la actualidad un vasto y gélido desierto, con una atmósfera muy tenue y carente casi por completo de campo magnético. Las radiaciones cósmica y solar penetran con facilidad alcanzando la superficie y esterilizando el entorno. Su tierra carece de nutrientes, lo que imposibilita el crecimiento de los vegetales.

La exploración del espacio nos ha ayudado a ser conscientes de cuán afortunados somos por vivir en un planeta que nos ofrece todo lo imprescindible para vivir, y cuyos recursos son tan valiosos como limitados, por lo que merecen ser cuidados y protegidos. En esa tarea los satélites nos ayudan a tomar decisiones orientadas a una gestión sostenible y efectiva de esos activos.

LA IMPORTANCIA DE LOS VEGETALES

Por lo general, la sociedad suele minusvalorar las especies vegetales, sin reparar en el hecho de que nuestra existencia depende principalmente de ellas. Nos proporcionan alimento, materiales con los que vestirnos, medicinas e incluso materiales de construcción, además de emitir oxígeno y absorber dióxido de carbono. A partir de la década de 1970, la comunidad científica fue adquiriendo, además, conciencia de la relación entre las funciones de los vegetales y el clima de la Tierra. Ello motivó en aquel entonces el diseño y construcción de instrumentos destinados a medir *in situ* los procesos fisiológicos de las plantas, como la fotosíntesis y la transpiración. La adquisición de los datos obte-

nidos por tales instrumentos era muy limitada, entre otros motivos porque se realizaba en marcos de tiempo cortos, por lo que se antojaba necesario una técnica que permitiera obtener información a nivel global y a más largo plazo para entender mejor esa relación entre los vegetales y el clima. La astronáutica vino a cubrir, precisamente, esa necesidad, con la puesta en órbita de ingenios destinados a la obtención de datos en períodos de meses e incluso de años.

En el capítulo anterior explorábamos la utilidad de los satélites estadounidenses de la serie Landsat para observar la huella humana desde el espacio. Estos vehículos han sido también empleados para elaborar mapas y catalogar los diferentes recursos naturales de la Tierra, además de para monitorizar las condiciones cambiantes del medioambiente a nivel global. Sus aplicaciones son muy variadas, destacando entre ellas las observaciones en los ámbitos de la silvicultura y la agricultura.

Entre los años 1969 y 1981, la entonces Unión Soviética desarrolló un programa de investigación espacial llamado Interkosmos, cuyo objetivo era facilitar el acceso a la órbita terrestre, tanto en el sector de los vuelos tripulados como en el de los robotizados, de aquellos países aliados del Bloque Comunista no provistos de programa espacial. En el ámbito robotizado, merecen destacarse las misiones Interkosmos 20 y 21, lanzadas desde el cosmódromo ruso de Plesetsk el 1 de noviembre de 1979 y el 6 de febrero de 1981, respectivamente. Estos vuelos tenían, entre otros, el objetivo de localizar altas concentraciones de vida marina, incluyendo a especies vegetales como las algas, que no son tan visibles como los bosques y selvas, pero de igual importancia para el ecosistema global.

Como se ha comentado, los vegetales forman parte esencial de la dieta de multitud de formas de vida, incluidos los seres humanos. Por tanto, un cambio drástico en la vegetación de una región o un continente puede dar lugar a uno de los mayores problemas a los que una sociedad puede enfrentarse: la hambruna.

El camino más claro hacia el universo es a través de la tierra salvaje.

JOHN MUIR

LA CLAVE ESTÁ EN LA CLOROFILA

El pigmento de las plantas llamado clorofila absorbe con facilidad la luz visible (en rangos que oscilan entre los 0,4 y los 0,7 micrómetros), dado que estas la utilizan para realizar la fotosíntesis. Por otra parte, la estructura celular de sus hojas refleja de manera intensa la luz en la banda del infrarrojo cercano (entre 0,7 y 1,1 micrómetros). En consecuencia, cuantas más hojas tenga una planta, más fácil será detectarla en las longitudes de onda antes mencionadas.

La fotosíntesis desde el espacio

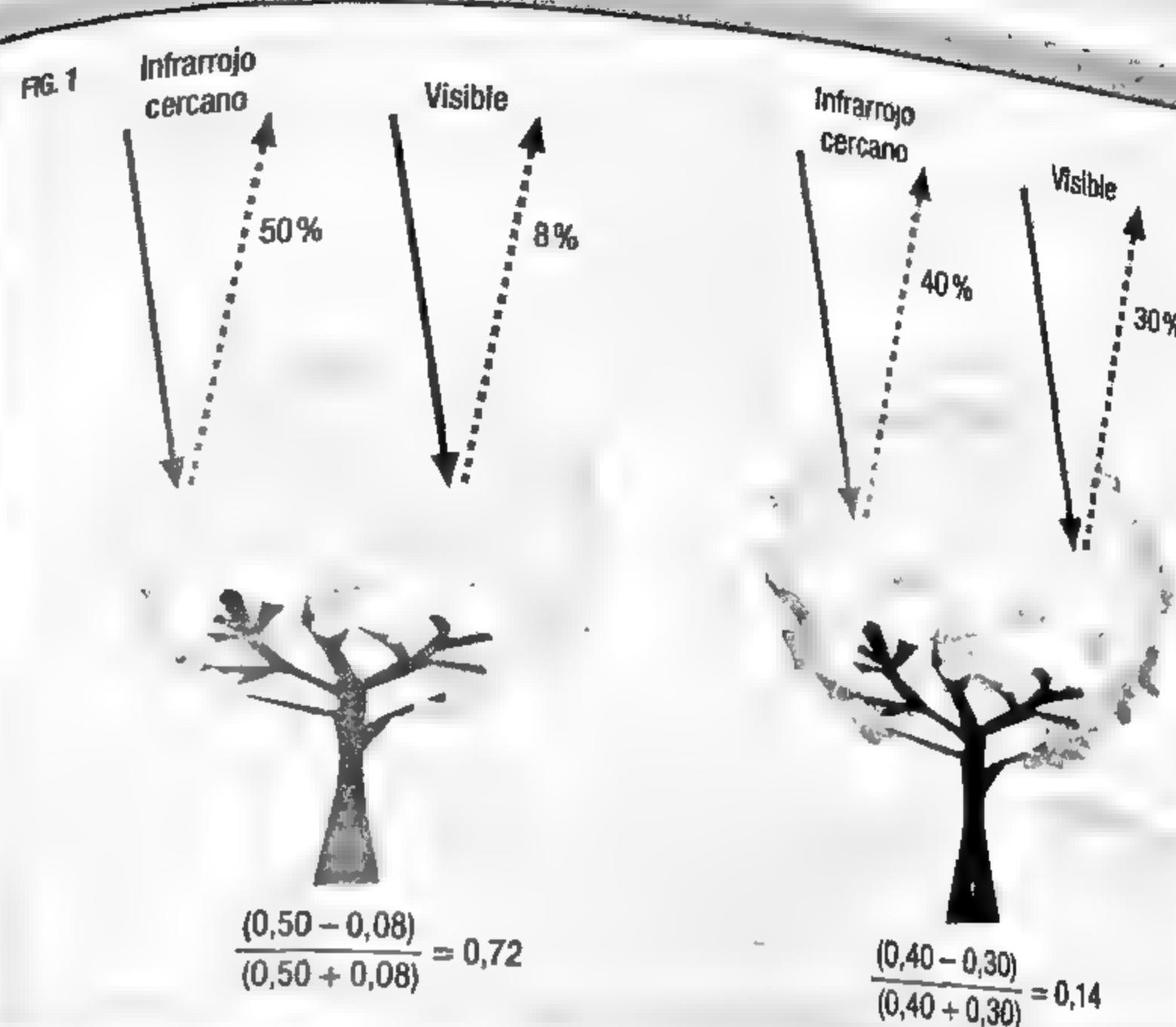
Los satélites estadounidenses NOAA y el europeo MetOp-A cuentan con un radiómetro avanzado llamado AVHRR, integrado por cinco detectores, dos de los cuales son tan sensibles que pueden realizar observaciones en rangos de 0,55 a 0,70 y de 0,73 a 1,0 micrómetros, respectivamente. Con ellos, se pueden obtener datos que permiten cuantificar la capacidad que tienen los vegetales de realizar la fotosíntesis. La resolución de este instrumento es tan alta que dicha cuantificación puede realizarse a partir de un solo pixel, que abarca una superficie de 1 km². Las diferentes longitudes de onda permiten clasificar los tipos de masas vegetales existentes en nuestro planeta. Así, si en un pixel es detectada más radiación reflejada en el infrarrojo cercano que en el rango visible, de ello se puede inferir que en ese punto existe una vegetación densa, lo que podría indicar la presencia de un bosque o una selva. Por el contrario, si la radiación reflejada en dichas longitudes de onda es más o menos la misma, ello indica que la vegetación es muy poco densa, pudiendo tratarse de un desierto, un prado o una tundra.

Una fórmula para deducir la densidad vegetal

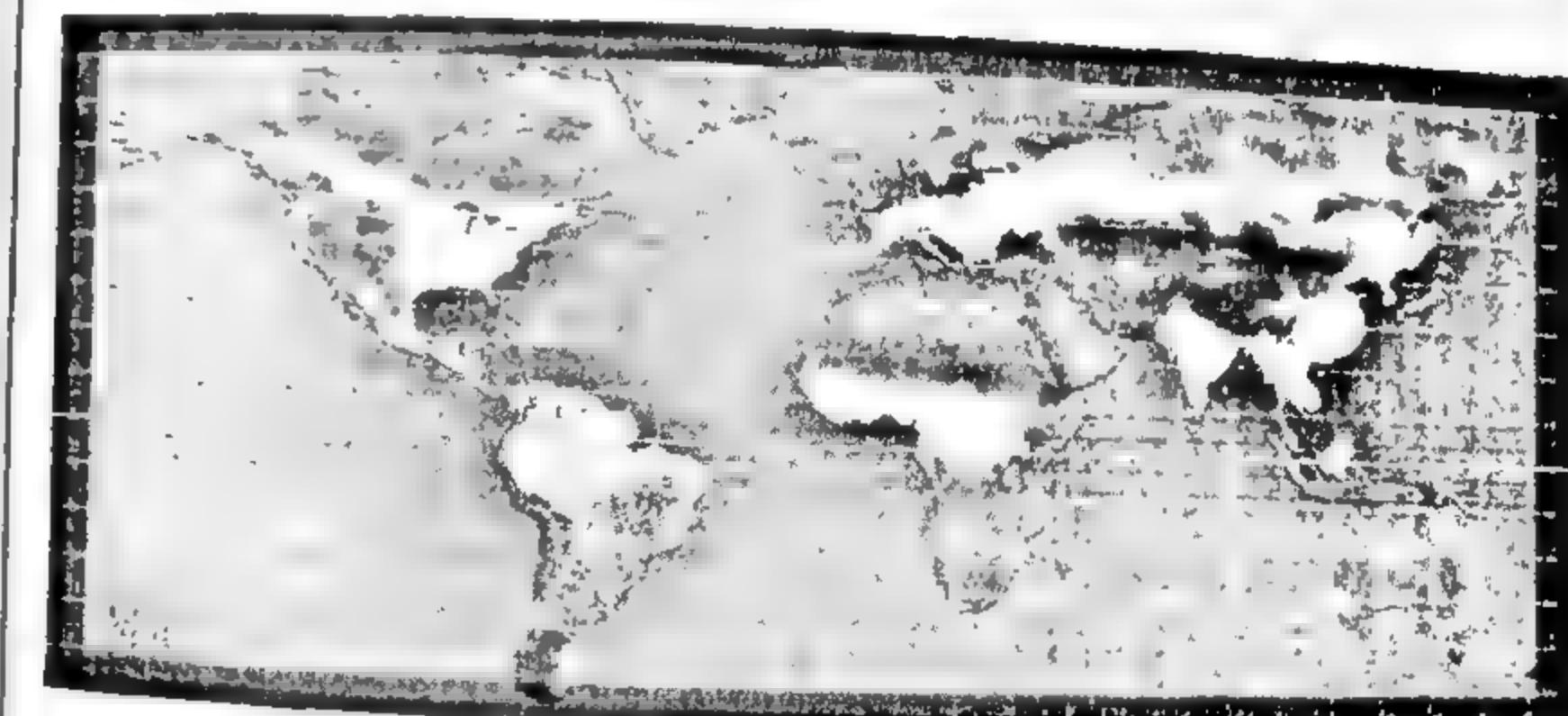
Los índices de vegetación mediante los cuales se cuantifica la densidad de crecimiento de las plantas se obtienen a partir de una fórmula que resta el índice de radiación visible al de radiación del infrarrojo cercano, dividido entre la suma de los mismos índices (figura 1). El resultado es conocido por el término de *Índice normalizado de diferencia de vegetación* (o NDVI, por sus siglas en inglés), y se expresa en micrómetros. Su expresión matemática es la siguiente:

$$NDVI = \frac{NIR - VIS}{NIR + VIS}$$

donde NIR hace referencia al infrarrojo cercano y VIS al rango visible. Un resultado igual o inferior a 0,1 corresponde a zonas áridas de roca, arena o nieve. Índices situados entre 0,2 y 0,3 representan extensiones en las que predominan los arbustos y los pastos. Un valor situado entre 0,6 y 0,8 indica la presencia de selvas tropicales. Existe además un segundo tipo de medida, denominado *Índice mejorado de vegetación* (o EVI en su acrónimo en inglés). El procedimiento para su obtención es el mismo, aunque el EVI corrige algunas distorsiones en la luz reflejada, causadas por la presencia de partículas suspendidas en el aire y por la superficie del terreno situado bajo la vegetación. Desde el espacio es posible también percibir el grado de actividad de la vegetación. Esto permite confeccionar mapas de actividad vegetal en los cuales uno de los cambios naturales que mejor se perciben es el estacional entre verano e invierno. En las regiones con suficiente contraste entre esas dos estaciones, la vegetación, bajo condiciones normales, aparece claramente más activa en verano que en invierno (figura 2).



Índice Normalizado de Diferencia de Vegetación (NDVI).

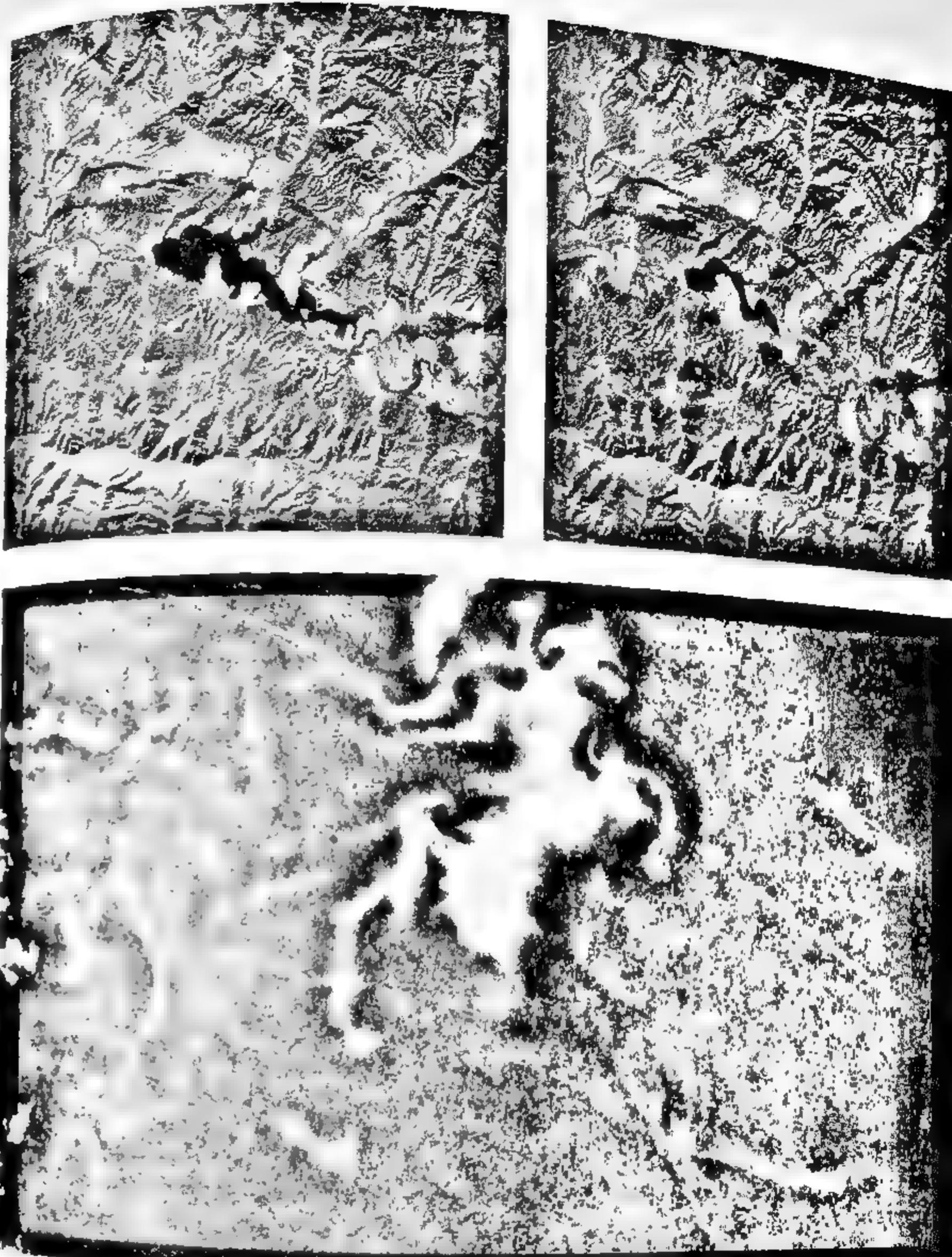


A través del sutil brillo que emiten los vegetales cuando procesan la luz solar durante la fotosíntesis, se puede distinguir desde el espacio el grado de actividad de la vegetación, que de manera natural varía mucho allá donde hay un gran contraste entre verano e invierno. En el mapa mostrado, con el verano en el hemisferio norte y el invierno en el sur, el norte brilla más en todas aquellas zonas con suficiente vegetación.

na. En el año 1975, los habitantes de la región africana del Sahel sufrieron una grave carestía al quedar desprovistos de vegetales debido a una intensa sequía. Tristemente, estos fenómenos son cada vez más frecuentes y afectan a multitud de regiones del planeta, debido a actividades no sostenibles y al cambio climático que está viéndose acelerado por la acción del ser humano (véanse las imágenes superiores de la página contigua).

Mediante instrumentos como el Radiómetro Avanzado de Muy Alta Resolución (AVHRR, por sus siglas en inglés), portados por los satélites estadounidenses de la serie NOAA y el europeo MetOp-A, se han podido generar millones de imágenes en diferentes longitudes de onda de la superficie terrestre. Usando un algoritmo conocido como «índice de vegetación», los científicos pueden cuantificar las concentraciones de vegetación de hoja verde existentes en el planeta. Tales índices, obtenidos diariamente, pueden ser combinados empleando datos generados en intervalos de 8, 16 o 30 días, para producir mapas detallados a partir de los cuales se puede determinar si las plantas se desarrollan correctamente o, por el contrario, sufren algún tipo de trastorno, como, por ejemplo, la falta de agua.

Además de las algas, los océanos albergan poblaciones de organismos microscópicos de tipo vegetal, llamados fitoplanton, que constituyen la base de la cadena trófica marina, sirviendo de sustento para pequeños peces y ciertos tipos de cetáceos. Su tamaño microscópico contrasta con su gran importancia e impacto en el clima global, por lo que el fitoplanton se ha convertido en uno de los campos de investigación en el ámbito de la oceanografía. Estos organismos, al igual que las plantas terrestres, contienen clorofila, un pigmento de color verde que es esencial para que los vegetales puedan realizar la fotosíntesis, es decir, la síntesis de nutrientes mediante la luz del Sol, fusionando las moléculas de agua con las del dióxido de carbono para generar un alimento esencial: los carbohidratos. Por tanto, son detectados desde el espacio mediante sensores que operan en el rango de la luz visible y en el del infrarrojo cercano, de modo que su población puede ser cuantificada gracias a los satélites (véase la imagen inferior de la página contigua).



Ariba, comparativa de imágenes, tomadas el 27 de octubre de 2013 y el 8 de noviembre de 2016, respectivamente, por el instrumento OLI a bordo del satélite Landsat 8, de la disminución del volumen de agua en el lago Cachuma (mostrado en color negro en el centro de cada imagen), que suministra agua a Santa Bárbara (California, Estados Unidos). El tamaño de la mancha negra es claramente más pequeño en la imagen de 2016 que en la de 2013. La inmensa estructura marina de la imagen inferior, con aspecto de nube de humo blanquecino, es una concentración de fitoplanton en aguas del Atlántico Norte, captada por el instrumento OLI del satélite Landsat 8.

EXPLORACIONES AGRÍCOLAS

Aunque intrínsecamente relacionada con el apartado anterior, la agricultura merece abordarse de manera independiente dado que se trata del cultivo de vegetales destinados exclusivamente al consumo, una técnica de obtención de alimentos que se remonta miles de años atrás en el tiempo, momento en que la especie humana experimentó la transición del nomadismo al sedentarismo, lo que redundó en la aparición de los primeros asentamientos permanentes.

Antes de la Era Espacial, los agrónomos se veían obligados a recorrer las amplias extensiones de cultivo a pie o mediante tractores para conocer *in situ* el estado de las plantaciones, una tarea difícil a la par que costosa. La llegada de los satélites les dotó con un recurso sin precedentes para conocer con detalle el estado de salud de extensas plantaciones y realizar un seguimiento de las mismas a través del tiempo. Hoy en día, mediante un simple ordenador con acceso a internet, es posible consultar las imágenes tomadas por vehículos como los Landsat, y conocer de manera instantánea el estado general de amplias áreas agrícolas. Mediante sus diferentes sensores, los satélites son capaces de advertir la presencia de enfermedades y plagas, áreas inundadas o zonas que precisan de un mayor regadío, e incluso detectar sustancias pesticidas que pudieran suponer un riesgo para las plantaciones. En definitiva, la información suministrada por los satélites permite actuar de una manera efectiva y rápida en caso de advertirse algún problema que amenace a la agricultura de una zona.

Existen plantaciones que requieren unas condiciones peculiares para su desarrollo, como, por ejemplo, el arroz. Se trata de un cereal que, en la actualidad, se consume a nivel mundial debido, entre otras cosas, a sus buenas propiedades nutricionales. En Asia ha adquirido una importancia máxima, dado que constituye el alimento básico de la población desde hace miles de años.

Las plantaciones de arroz en Asia se localizan principalmente en los deltas de los ríos que descienden de la cordillera del Himalaya, entre ellos el Mekong, el Song Hong, el Chao Phraya y el Irawadi, y en las laderas de las montañas que reciben importan-

tes cantidades de agua de lluvia. Los arrozales precisan de unas condiciones caracterizadas principalmente por la abundancia de agua, proveniente, en buena medida, de las fuertes lluvias registradas durante el monzón. El cultivo se realiza en determinados períodos del año, con el propósito de sincronizar el crecimiento de las plantas con el del nivel de agua. Una variación en la tasa de precipitaciones puede suponer una importante merma en la producción de arroz, lo que conllevaría un serio perjuicio tanto social como económico.

Los países productores de arroz precisan de información detallada que les permita conocer el momento idóneo para la siembra del cereal, y elegir la variedad que mejor se adapte a las condiciones ambientales. Se dijo con anterioridad que, en agricultura, la observación y comprobación *in situ* de las plantaciones es una tarea costosa y difícil, máxime en el ámbito de los arrozales, cuyo desarrollo tiene lugar en campos inundados. En este sentido, los satélites son la herramienta perfecta para adquirir esos datos de una manera rápida y continua, especialmente aquellos dotados de radares, dado que estos pueden penetrar a través de las nubes y obtener información sobre el estado de las plantaciones, independientemente de las condiciones meteorológicas reinantes en la zona. Un ejemplo de ello se muestra en la figura I.

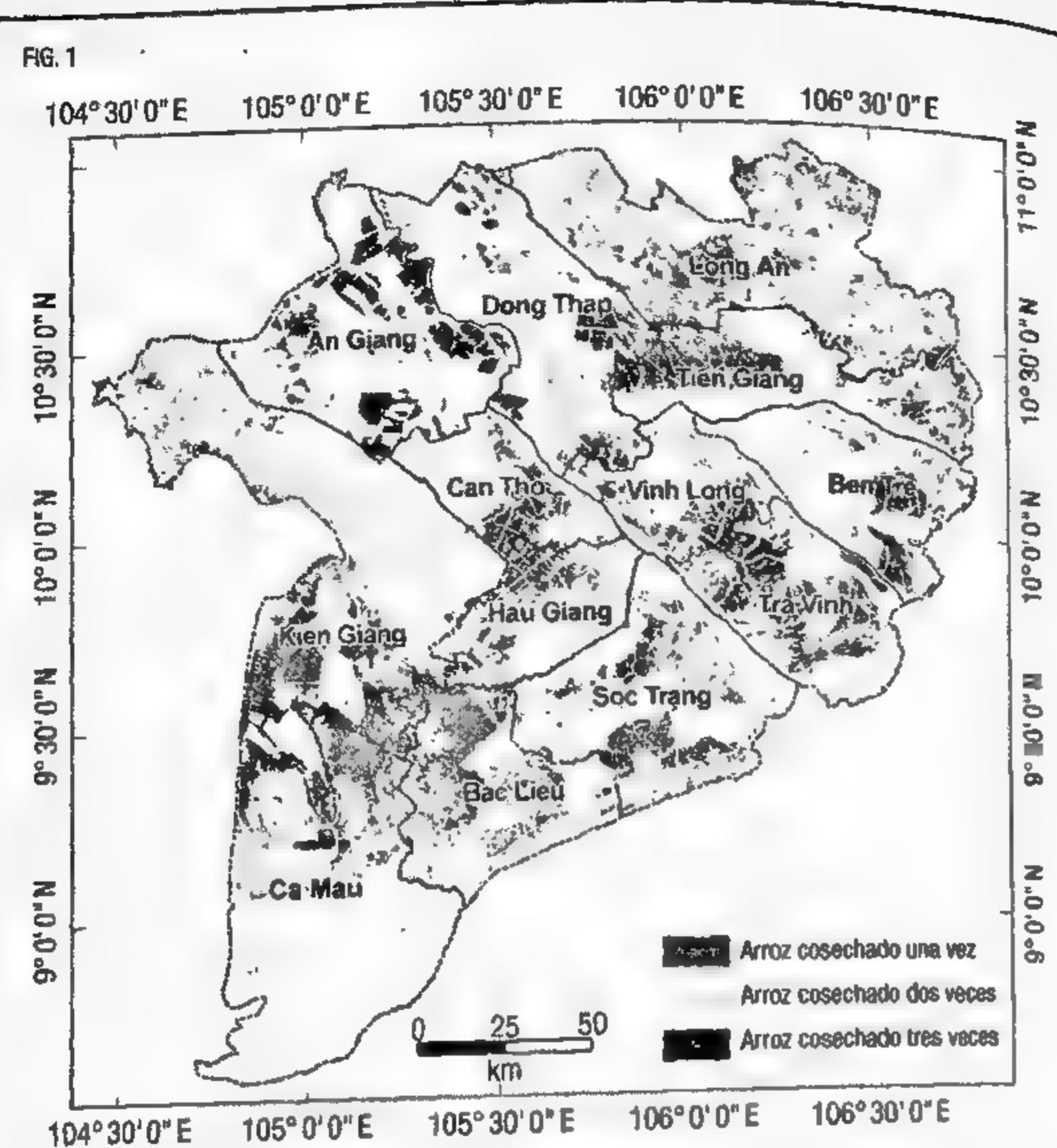
La Tierra proporciona lo suficiente para satisfacer las necesidades de todo hombre, pero no su avaricia.

MAHATMA GANDHI

EL ELEMENTO MÁS PRECIADO PARA LA VIDA

Al principio del presente capítulo se abordaba el importante papel que el agua desempeña en el florecimiento y desarrollo de la vida, motivo por el cual se la considera el elemento máspreciado de nuestro planeta. La Tierra contiene del orden de 1390 millones de kilómetros cúbicos de agua, el 97% de la cual conforma los mares y los océanos. Solo un 3% de ese volumen está constituido por agua dulce, del que dos terceras partes están contenidas en los glaciares, en el permafrost y en los acuíferos, siendo

FIG. 1



Mapa de cultivo del arroz en el delta del río Mekong (Vietnam), realizado a partir de los datos obtenidos por el radar de apertura sintética del satélite europeo Envisat. El análisis de los datos lo llevó a cabo el equipo de Duy Ba Nguyen, de la Universidad de Tecnología de Viena, y sus colaboradores de esa y otras instituciones. Los resultados se dieron a conocer públicamente a través de la revista académica *Remote Sensing* en 2015.

muy difícil su obtención. Una ínfima porción se encuentra en forma de vapor suspendido en la atmósfera, la suficiente como para influir en el clima del planeta, jugando un papel esencial en el transporte del agua oceánica y su posterior precipitación sobre la superficie terrestre, alimentando los ríos y los lagos. Es precisamente esta última la que podemos considerar renovable y apta para un consumo sostenible, sin tener que recurrir a las

EL CICLO DEL AGUA

EL CICLO DEL AGUA

El agua que bebemos es producto de una serie de procesos y transformaciones que tienen lugar en diferentes partes de nuestro planeta, y en su conjunto conforman lo que conocemos como ciclo del agua, el cual depende de multitud de factores, siendo el principal de ellos la radiación solar.

Evaporación

El Sol es el motor del ciclo del agua. El calor procedente de nuestra estrella produce la vaporación en océanos, ríos, lagos y otras masas de agua.

Condensación

El agua evaporada se eleva en la atmósfera. En su ascenso, encuentra temperaturas cada vez más bajas, lo que fomenta su condensación, formando las nubes. Los vientos atmosféricos desplazan las nubes a lo largo y ancho del planeta.

Precipitación

El vapor de agua, al condensarse, forma paulatinamente partículas cada vez más grandes. En el momento que estas se vuelven demasiado pesadas, caen a la superficie terrestre. En función de la temperatura ambiental, el agua alcanza la superficie terrestre en forma de lluvia, granizo o nieve. Esta se acumula en la superficie o bajo ella, pudiendo experimentar la escorrentía que acaba transportándola de nuevo al mar, donde el ciclo vuelve a comenzar.

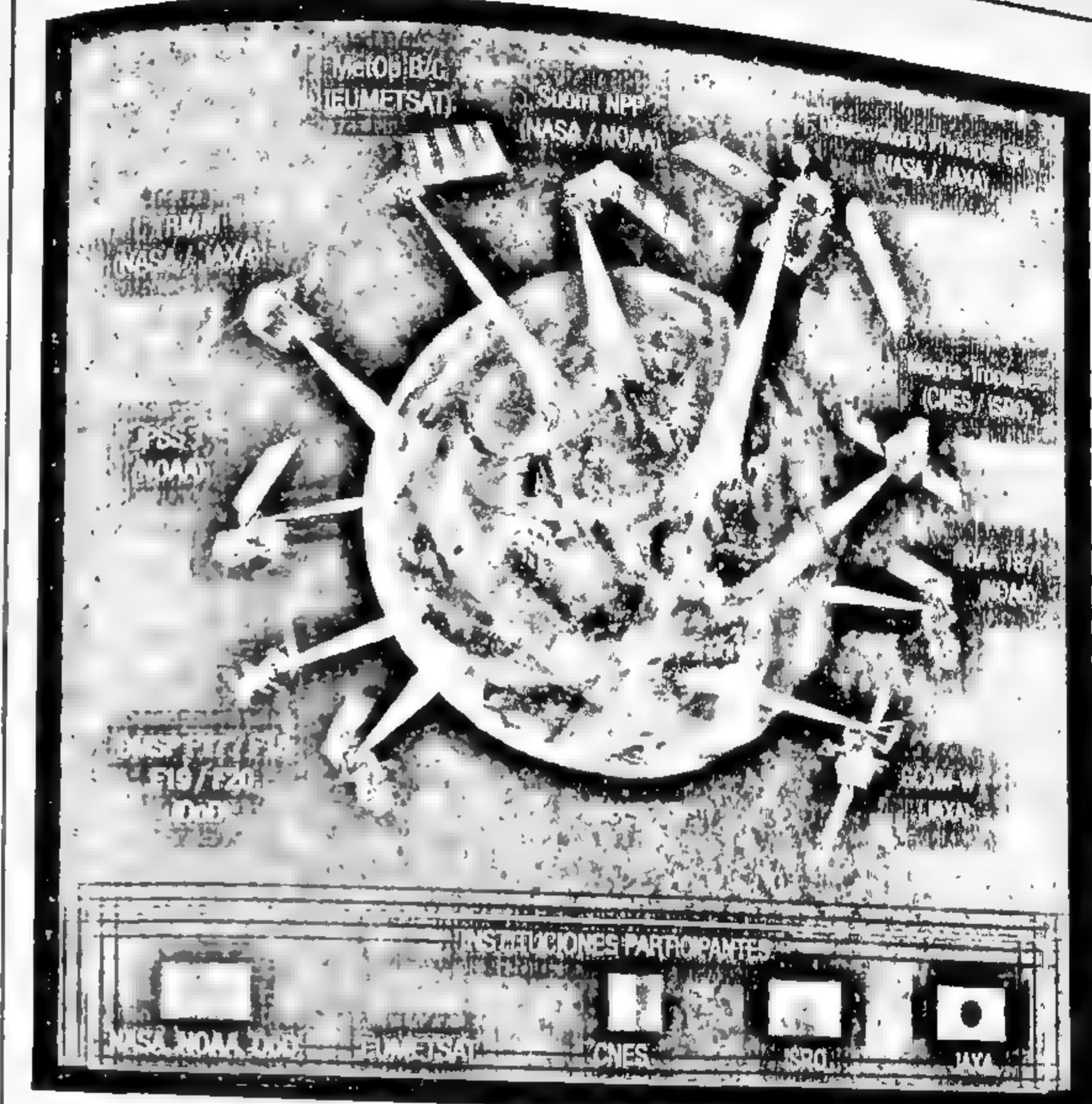


fuentes de difícil acceso. Ello convierte al agua potable en un recurso muy escaso, sobre todo en lugares donde predominan los climas desérticos y la aridez del terreno impide la extracción de este preciado elemento. La contaminación y el crecimiento demográfico a nivel global son otros factores que están contribuyendo a que, paulatinamente, nuestro planeta cuente con menores reservas de agua que pueda destinarse al consumo.

Los satélites son una pieza esencial en el estudio de los procesos de condensación, precipitación, transpiración y evaporación, englobados en lo que comúnmente conocemos como ciclo del agua. Para determinar la evolución de este ciclo es importante conocer, entre otras cosas, la temperatura de la atmósfera, su índice de humedad, las características de la cubierta nubosa, la temperatura de mares y océanos, la velocidad de los vientos oceánicos y el estado de la círosfera, aspectos que se abordaron previamente en los capítulos dedicados a la meteorología y la climatología, y que pueden ser medidos con gran precisión gracias a los instrumentos, cada vez más sensibles, portados por los satélites. Sin embargo, las precipitaciones, que constituyen un parámetro esencial, son muy difíciles de medir con detalle, dado que se caracterizan, entre otras cosas, por su gran variabilidad en el espacio y en el tiempo. Las observaciones realizadas en los rangos visible e infrarrojo del espectro desde la órbita geoestacionaria fueron, durante algunos años, la manera más efectiva de realizar mediciones en este sentido. La puesta en marcha el 27 de noviembre de 1997 de la misión TRMM, un proyecto conjunto entre las agencias espaciales estadounidense (NASA) y japonesa (JAXA), supuso un avance sustancial en la materia. Situado en órbita terrestre baja a unos 380 kilómetros de altura media, este ingenio estaba dotado con sendos instrumentos denominados PR (acrónimo de Radar de Precipitación) y TMI (Captador de Imágenes de Microondas). Estos sensores, de carácter activo y pasivo, respectivamente, eran capaces de obtener información de gran valor vinculada a la distribución tridimensional de las precipitaciones y al calentamiento de los trópicos.

El éxito de la misión TRMM propició la puesta en marcha de la constelación GPM (figura 2). GPM es el acrónimo inglés de Medi-

FIG. 2



Constelación de satélites que conforman el sistema de Medición de la Precipitación Global (GPM).

ción de la Precipitación Global. Su satélite insignia, llamado Observatorio Principal GPM, fue lanzado desde el Centro Espacial de Tanegashima (Japón) el 27 de febrero de 2014, y es fruto, al igual que el TRMM, de la colaboración entre la NASA y la JAXA. A esta constelación se han unido otros ingenios lanzados previamente al espacio, entre ellos los europeos MetOp B (manejado por EUMETSAT, al que se unirá el MetOp C en 2018) y Megha-Tropiques (mi-

sión de colaboración del CNES y la Agencia India de Investigación Espacial, ISRO), los estadounidenses NOAA 18 y 19, y JPSS 1 (manejados por la NOAA), satélites meteorológicos pertenecientes al Departamento de Defensa de Estados Unidos (DoD), así como el propio TRMM. El propósito principal de la constelación GPM es realizar medidas de las precipitaciones en intervalos de 2-3 horas.

Otros satélites no pertenecientes a la GPM también han realizado estudios en este campo. De entre ellos destaca la misión estadounidense Aqua, lanzada el 4 de mayo de 2002, que continuó y mejoró sustancialmente las medidas relacionadas con las tasas de precipitaciones previamente obtenidas por el TRMM, gracias a un instrumento denominado AMSR-E (acrónimo de Radiómetro Avanzado de Barrido de Microondas del Sistema de Observación de la Tierra). Asimismo, la misión Aquarius, desarrollada entre los años 2011 y 2015 por la NASA en colaboración con la Comisión Nacional de Actividades Espaciales de Argentina, ha aportado información en este sentido, con especial atención a la tasa de agua dulce que procede o se incorpora a los océanos como consecuencia del ciclo del agua. Las aplicaciones de los datos obtenidos por estas misiones son variadas, y entre ellas figuran la gestión del agua, la eficiencia agrícola y la calidad del aire.

La necesidad de la cooperación internacional

El agua dulce es un bien cada vez máspreciado y escaso, a medida que la población mundial aumenta y depende de los mismos recursos para su obtención. Esto ha propiciado que diversas agencias espaciales pongan en marcha programas de cooperación internacional enfocados en una mejora de la gestión de este recurso imprescindible para la vida.

Los satélites nos han ayudado a comprender el valor que tiene el agua, y las dificultades de obtenerla en determinadas partes del planeta. A través de los datos adquiridos desde la órbita terrestre, los científicos cuentan con los recursos necesarios para establecer líneas efectivas de actuación para la gestión del agua. Tales líneas incluyen, entre otros, el seguimiento en tiempo real

del nivel de los lagos a nivel mundial y el establecimiento de programas de colaboración con aquellos países, especialmente en América del Sur y el continente africano, que encuentran serias dificultades para la obtención del líquido elemento, facilitando datos que ayuden a la localización de manantiales cuyas aguas puedan ser utilizadas para el consumo humano. Asimismo, gracias a los radares, se pueden obtener datos de los niveles de agua contenidos en acuíferos, pudiendo alertar a la población en caso de que estos se encuentren próximos a agotarse.

RECURSOS PARA EL DESARROLLO

Hace miles de años, el ser humano precisaba de muy pocos recursos para subsistir. Obtenían agua de los ríos y lagos, así como alimentos a partir de los vegetales y los animales, de los que también conseguían las materias primas para elaborar ropajes y utensilios de caza, pesca y defensa. Con el transcurso del tiempo, nuestra evolución como civilización ha ido acompañada de la necesidad de nuevos recursos, cuyo punto de inflexión tuvo lugar a finales del siglo XIX con el advenimiento de la llamada Revolución industrial, caracterizada por la producción en serie mediante la introducción de máquinas cuyo funcionamiento se basaba en el petróleo, el carbón y el gas, conocidos como combustibles fósiles, que son productos de un proceso de descomposición anaeróbica, es decir, sin la presencia de oxígeno, de materiales orgánicos pertenecientes a seres vivos que murieron hace millones de años. Nuestra evolución nos ha obligado a buscar nuevos recursos, no solo animales y vegetales, sino también minerales.

Como se ha visto, los satélites están dotados de diversos instrumentos capaces de caracterizar los diferentes rasgos de nuestro planeta. Pueden no solo detectar los elementos que componen la atmósfera y medir la densidad vegetal que existe en la superficie. También son capaces de determinar de qué compuestos químicos está constituida esta última. Esta información es útil en el ámbito de la geología, así como en una actividad vinculada a esta ciencia, la minería, esencial para la obtención de aquellos

Desastres naturales

recursos imprescindibles hoy en día para el desarrollo de la civilización. En este sentido, los datos e imágenes proporcionados por los satélites, en especial los estadounidenses Landsat y los franceses SPOT, han sido y siguen siendo muy utilizados en este sector, dado que a través de sus instrumentos son capaces de elaborar mapas geológicos y detectar la localización de fallas y fracturas en la superficie terrestre, donde se suelen localizar depósitos minerales de gran interés. En consecuencia, los satélites constituyen un recurso versátil para conocer en qué localizaciones deben establecerse las explotaciones mineras.

Con una población en continuo crecimiento y unos recursos limitados, las imágenes de la Tierra desde el espacio están sirviendo también como base para la implementación de protocolos de sostenibilidad, acordados en diferentes cumbres internacionales como las celebradas en Montreal (Canadá, 1987), Río de Janeiro (Brasil, 1992), Johannesburgo (Sudáfrica, 2002) y Kigali (Ruanda, 2016), extensivos no solo a la industria y a la minería, sino también a la agricultura y, especialmente, a la gestión del agua.

La Tierra es un planeta muy dinámico, y su actividad a menudo desencadena fenómenos que constituyen una seria amenaza para la vida a corto plazo. Desde huracanes y sequías hasta terremotos y tsunamis, los datos proporcionados sobre ellos por los satélites son esenciales para salvar miles de vidas al año.

Llamamos desastres naturales a todos aquellos fenómenos cuyo desarrollo afecta profunda y negativamente a una determinada región o área de nuestro planeta. Tales fenómenos conllevan, en gran medida, la pérdida de vidas humanas.

Los desastres naturales son inherentes a la Tierra dado que son generados por el propio planeta debido a cómo está conformada su estructura interna y a las características de su atmósfera. Se trata, en definitiva, de fenómenos que no pueden evitarse, si bien sus efectos pueden mitigarse y paliarse de una manera ciertamente efectiva, introduciendo protocolos orientados, entre otras cosas, a reducir la mortalidad, el número de personas afectadas y las pérdidas económicas provocadas por estos desastres. Los satélites juegan un papel destacado en la implementación de tales protocolos, dado que son capaces de obtener un importante volumen de datos sobre fenómenos que pueden desencadenar desastres naturales o directamente sobre estos últimos, tanto a escala local como regional y global. Su ubicación en el espacio y sus avanzados instrumentos les permiten recopilar tales datos de forma ininterrumpida, en condiciones tanto diurnas como nocturnas e independientemente de

las condiciones climatológicas reinantes. En esencia, los satélites actúan como centinelas, monitorizando y evaluando constantemente todos aquellos fenómenos que pudieran suponer un riesgo para la vida, a corto, medio y largo plazo. Ese es uno de los principales motivos por los que más de 40 países de todo el mundo están realizando importantes inversiones en programas de observación de la Tierra, destinando en su conjunto del orden de 7500 millones de dólares anuales, procedentes tanto del sector público como del privado.

CONVULSIONES TELÚRICAS

Estamos acostumbrados a pensar que vivimos sobre una tierra sólida, cuando lo cierto es que la corteza terrestre «flota» sobre un mar de magma. Las *placas tectónicas* se encuentran continuamente en movimiento, y estas chocan entre sí con frecuencia debido a los desplazamientos que forman parte de un proceso de regeneración de la corteza terrestre. Esos choques son los responsables del desencadenamiento de los seísmos o terremotos.

En el capítulo 4 se indicaba la utilidad que tienen los radares espaciales para la elaboración de complejos y detallados mapas topográficos de la Tierra, cuyos datos son empleados en una gran diversidad de campos del saber humano, entre ellos la arqueología. Pues bien, tales datos resultan igualmente útiles en el estudio de lugares propensos a sufrir terremotos, como el popular Anillo de Fuego, una región situada en el océano Pacífico muy activa desde el punto de vista sísmico y volcánico. Los estudios científicos han demostrado que las anomalías tanto gravitatorias como topográficas están relacionadas con la sismicidad a gran escala y con la existencia de *zonas de subducción*, es decir, lugares en los que la corteza terrestre se sumerge en el manto terrestre, proceso causante de seísmos que forma parte de la dinámica de regeneración de la corteza del planeta. Por tanto, las observaciones realizadas desde el espacio con instrumentos de alta resolución son esenciales para determinar tales anomalías y realizar seguimientos sobre territorios de alta actividad sísmica.

Las primeras aplicaciones de las imágenes por satélite en el ámbito de la sismología estaban relacionadas con la geología estructural y la geomorfología. La primera imagen detallada de un terremoto desde el espacio no fue obtenida hasta el 28 de junio de 1992, fecha en que tuvo lugar el de Landers (California, Estados Unidos). El satélite europeo ERS 1, mediante su radar InSAR (Radar de Apertura Sintética Interferométrica), obtuvo una imagen de gran resolución de aquel movimiento sísmico, cuyos efectos en la corteza terrestre pudieron determinarse superponiendo aquella imagen con otra tomada con anterioridad al terremoto, una técnica englobada en el campo de la *interferometría* que proporciona una información muy útil para determinar las deformaciones que experimenta el terreno como consecuencia de los movimientos sísmicos y fenómenos asociados a ellos, como los desplazamientos y corrimientos de tierra.

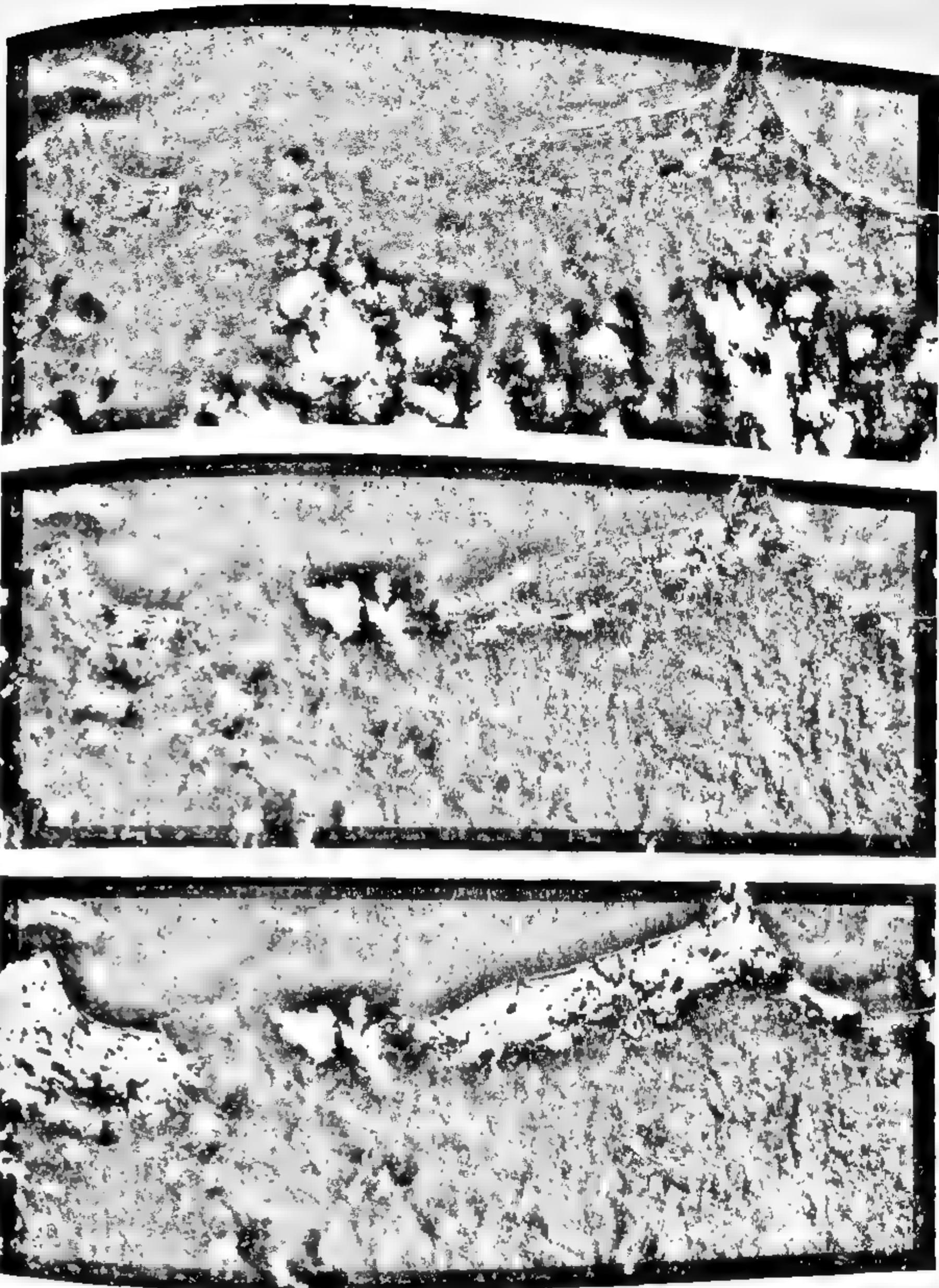
El 25 de abril de 2015, un violento terremoto de magnitud 7,8 sacudió Nepal, acabando con la vida de más de 8000 personas, hiriendo a casi 20 000 y provocando el desplazamiento de cientos de miles en las proximidades de la cordillera del Himalaya. Las imágenes tomadas por el radar de apertura sintética del satélite europeo Sentinel 1A previamente y con posterioridad al seísmo, determinaron que aquel movimiento modificó notablemente la forma de la Tierra, provocando la elevación y el hundimiento de importantes extensiones de terreno en un rango de 2,3 y 1,5 m, respectivamente. La falla que causó aquel terremoto, situada en el límite de las placas tectónicas euroasiática e india, experimentó un desplazamiento cercano a los 6 m. Teniendo como base los datos obtenidos por el Sentinel 1A, científicos de la ESA, el DLR y el JPL de la NASA iniciaron un detallado seguimiento de los territorios próximos a la cordillera del Himalaya con el propósito de comprender mejor los procesos de tipo sismológico y recopilar información que sea de utilidad para los cuerpos de seguridad, emergencia y protección civil ante futuros seísmos.

Los terremotos y los tsunamis son un recordatorio de lo realmente frágil que es nuestro mundo moderno.

GEORGE MAXWELL ALAGIAH

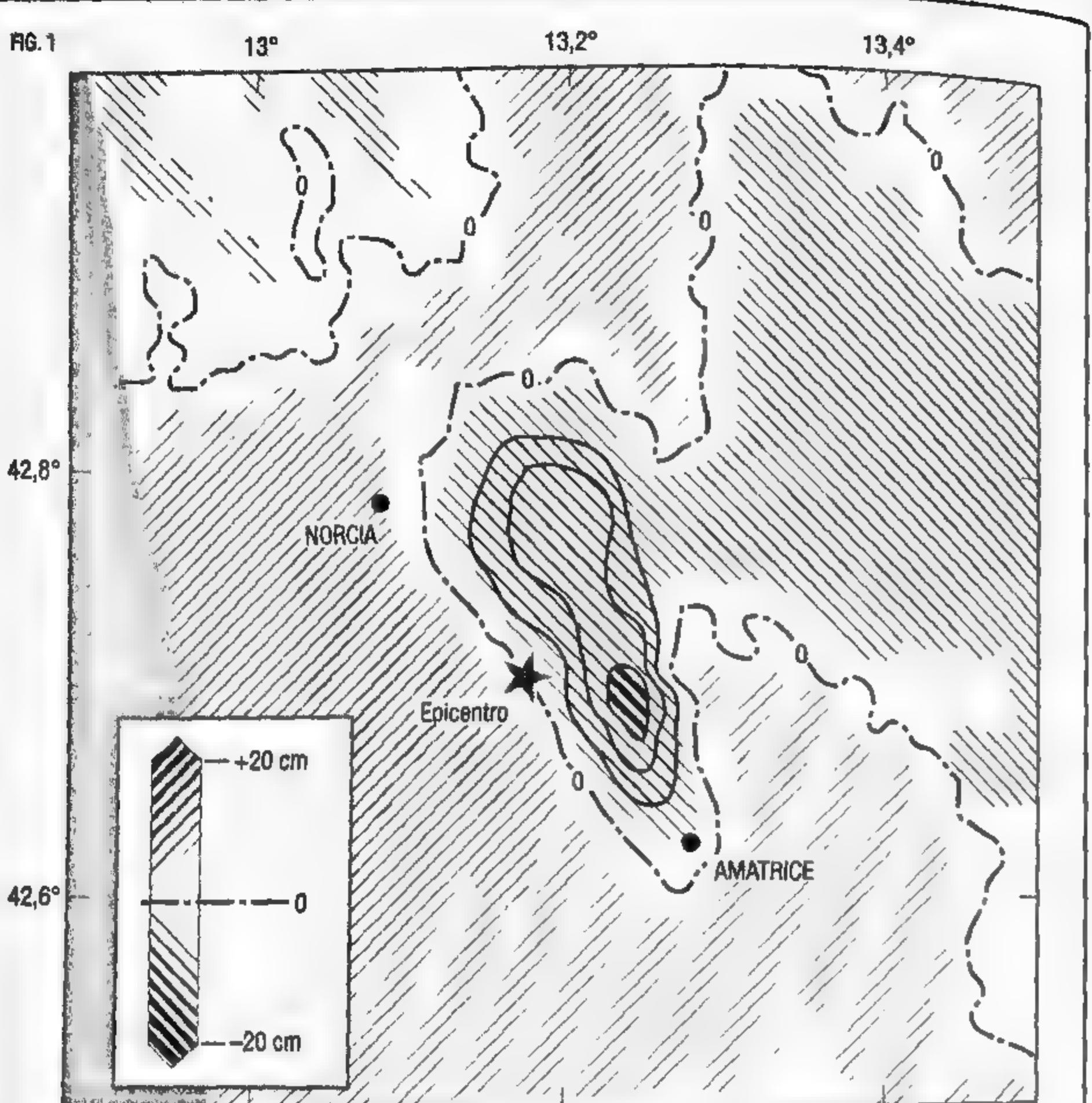
Con la misma finalidad, los científicos del proyecto ARIA, por las siglas de *Advanced Rapid Imaging and Analysis* (Captación y Análisis Rápidos y Avanzados de Imágenes), que es una colaboración entre el JPL y el Instituto Tecnológico de California, confeccionaron un mapa de la deformación dejada por el terremoto de agosto de 2016 en la superficie de la zona de Italia más afectada por dicho seísmo. Lo hicieron analizando imágenes de radar de apertura sintética interferométrica captadas desde el satélite ALOS 2 de la JAXA (la agencia espacial japonesa) meses antes del terremoto y poco después del mismo. También se emplearon datos de Google Earth. La figura 1 muestra de manera simplificada los detalles principales de la deformación sufrida por el terreno.

Aunque los terremotos tienen un gran poder de destrucción por ellos mismos, son capaces, en ocasiones, de desencadenar otros fenómenos igualmente asoladores. A las 00:58 UTC del 26 de diciembre de 2004, tuvo lugar en la costa de Sumatra (Indonesia) uno de los mayores movimientos sísmicos registrados en los últimos cincuenta años. Aquel terremoto, de magnitud 9, se generó por la colisión de dos placas tectónicas, la india y la de Myanmar (Birmania). El choque de ambas provocó la subducción de la primera y la elevación de la segunda, causando un importante desplazamiento del lecho oceánico que redundó en la formación de olas marinas de gran envergadura, llamadas comúnmente tsunamis (término que, en japonés, significa «olas de puerto»). Gracias a su espectrómetro de cartografía de ángulo múltiple (MISR, por sus siglas en inglés), el satélite Terra de la NASA tomó varias imágenes entre las 05:14 y las 05:17 UTC en las que se apreciaba cómo aquellas olas, que se desplazaban por el mar a velocidades próximas a los 640 km/h, se aproximaban a la costa oriental de la India. Conforme las olas llegaban a aguas poco profundas de zonas costeras en las naciones amenazadas, su velocidad disminuía notablemente mientras su altura se hacía considerablemente mayor, así como su capacidad destructiva. Al alcanzar la costa, las olas, que afectaron con especial intensidad a Indonesia, causaron la muerte de aproximadamente 150 000 personas, y daños económicos que se contaron por millones de dólares. Las diferentes imágenes tomadas por el espectrómetro



Imágenes captadas por el satélite Terra el 15 de noviembre de 2002 (superior) y el 31 de diciembre de 2004 (central e inferior) en las que son inferibles los daños del tsunami que en 2004 azotó la costa norte de Phuket (Indonesia). El distinto color de la costa el día 31 (similar al natural en la central y procesado en la inferior) marca el área principal que se inundó. En las imágenes hay también nubes, con aspecto algodonoso, y sus respectivas sombras en la superficie.

FIG. 1



Deformación del terreno dejada por el terremoto de agosto de 2016 en la superficie de la zona de Italia más afectada por la catástrofe. En algunas zonas, el terreno ha quedado hundido, y en otras, elevado. Las fronteras principales entre bloques, sinuosas, están marcadas con trazo de línea y punto alternados y se les asigna el valor 0. A más grosor de las líneas de la textura del terreno de cada bloque, más ha sido su hundimiento o su elevación. Las estructuras anidadas, a la derecha del epicentro, entre las localidades de Norcia y Amatrice, son un caso aparte por sufrir el hundimiento mayor, creciente en dirección a la estructura central.

MISR a bordo del satélite Terra suministraron datos que sirvieron para determinar la ubicación de las olas y su ángulo con relación a la costa, así como su velocidad de propagación, lo que permitió

cronometrar su desplazamiento. El análisis de estos datos, en combinación con las medidas batimétricas de la profundidad oceánica, sientan las bases para la elaboración y calibración de modelos de propagación de los tsunamis, los cuales son de vital importancia a la hora de implementar sistemas de alerta temprana que redundarán en una importante reducción de víctimas causadas por estos fenómenos naturales en un futuro cercano.

LA FUERZA DESTRUCTIVA DEL VIENTO

El viento, traducido en su máxima expresión en tornados o en huracanes, puede causar una devastación similar a la provocada por un intenso terremoto, siendo más peligrosos los primeros, dado que se forman rápidamente, sin previo aviso, y sus vientos pueden llegar a ser mucho más intensos que los segundos. De hecho, cada año se registran más muertes provocadas por tornados que por huracanes.

Los tornados son fenómenos difícilmente observables de manera directa desde el espacio. Sin embargo, las células tormentosas que los generan pueden advertirse con claridad, así como el rastro que los tornados dejan al desplazarse sobre la superficie terrestre. Entre el 25 y el 28 de abril de 2011, se formaron 363 tornados en territorio estadounidense que causaron la muerte de 348 personas y daños por un valor estimado de 11 000 millones de dólares. Uno de los estados que sufrió la furia de aquellos fenómenos fue Alabama. Los habitantes de Tuscaloosa fueron testigos de cómo un tornado EF-4 (nivel 4 en la escala mejorada de Fujita, que mide la intensidad de los vientos de los huracanes) se internaba en el centro urbano de aquella localidad con vientos que oscilaban entre los 267 y los 321 km/h, para, seguidamente, adentrarse en las zonas rurales circundantes. La huella que dejó aquel tornado, de 2,5 km de ancho, fue captada por el satélite Landsat 5 un mes después de que azotara la zona. En la imagen producida por su instrumento TM podía apreciarse un surco de tonalidades claras que se extendía a lo largo de decenas de kilómetros, y que contrastaba con las gamas verdes y oscuras

propias de los vegetales de la región. Aquel surco aún era visible en otra imagen captada el 23 de abril de 2016 por el instrumento OLI (acrónimo de Cartografía Operativa de Terreno) a bordo del satélite Landsat 8. Como se ha dicho, aunque la observación directa de los tornados desde el espacio es muy difícil, la detección y seguimiento de las células productoras de estos fenómenos destructivos mediante satélite es primordial para activar los protocolos de alerta y emergencia con anterioridad a la formación de estos fenómenos naturales tan destructores.

En el ojo de un tornado, no existe el arriba ni el abajo, no hay suelo ni cielo.

FRANCIS ALTS

A diferencia de los tornados, los huracanes son fácilmente observables desde el espacio, dado que se trata de células tormentosas de envergaduras colosales, con diámetros que pueden abarcar centenares de kilómetros. Al igual que ocurre con los tornados, cuya intensidad de sus vientos es medida por la escala de Fujita, los huracanes son clasificados en la escala denominada Saffir-Simpson, estipulada en cinco niveles, proporcionales a la intensidad de los vientos sostenidos generados por los huracanes.

En el año 1900, un huracán se adentró por sorpresa en el golfo de México, descargando su poder sobre la isla de Galveston y acabando con la vida de, al menos, 8 000 personas, convirtiéndose así en el desastre natural más importante que haya tenido lugar en territorio estadounidense. Afortunadamente, hoy en día, gracias a los satélites se ha podido establecer un sistema de seguimiento continuo, de manera que la formación de un huracán o tormenta tropical puede advertirse en cualquier región del planeta, así como su poder destructivo. Esta información es de vital importancia dado que sirve para alertar a la población con días e incluso semanas de antelación.

Los primeros datos sobre la formación, ciclos de los huracanes y su potencial destructivo fueron adquiridos por el satélite ATS 3 (acrónimo de Satélite de Aplicaciones Tecnológicas), lanzado por la NASA el 5 de noviembre de 1967. Además de enviar a la Tierra la primera imagen en color del planeta obtenida desde la órbita geoestacionaria, los datos obtenidos sobre el huracán

Camilla en 1969 permitieron evacuar a tiempo las localidades costeras del estado de Mississippi (Estados Unidos), salvando así centenares de vidas humanas.

El 15 de diciembre de 2016, la NASA inició un programa de investigación espacial centrado en los huracanes, con el lanzamiento de ocho microsatélites que forman la constelación CYGNSS (acrónimo de Sistema Global de Satélites de Navegación para los Ciclones), destinada a la realización de una misión sin precedentes: la adquisición de datos de las regiones más violentas y dinámicas localizadas tanto en las tormentas tropicales como en los huracanes. Los satélites de la constelación CYGNSS obtendrán datos de los vientos registrados en la superficie oceánica tanto en el interior del núcleo de los huracanes como en las zonas próximas a él, abarcando asimismo las regiones inferiores de los muros nubosos que constituyen los ojos de los huracanes y las bandas de precipitación, áreas que no habían podido ser medidas previamente desde el espacio.

LAVA Y CENIZAS

Tal como se indicaba en líneas anteriores, y contrariamente a lo que generalmente creemos, la corteza terrestre no se encuentra asentada en tierra sólida, sino que flota sobre un mar de magma, cuya presión y temperatura son muy elevadas. Esta presión, en combinación con el movimiento de las placas tectónicas, produce fracturas en la corteza terrestre, a través de las cuales el magma fluye al exterior, un fenómeno conocido como erupción volcánica.

Los volcanes son parte de un proceso natural de regeneración de la corteza terrestre, y son mucho más comunes en lugares próximos a los límites de placas tectónicas. Así, encontramos regiones como el Anillo de Fuego, del que dábamos cuenta previamente al abordar los terremotos, muy activas desde los puntos de vista sísmico y volcánico.

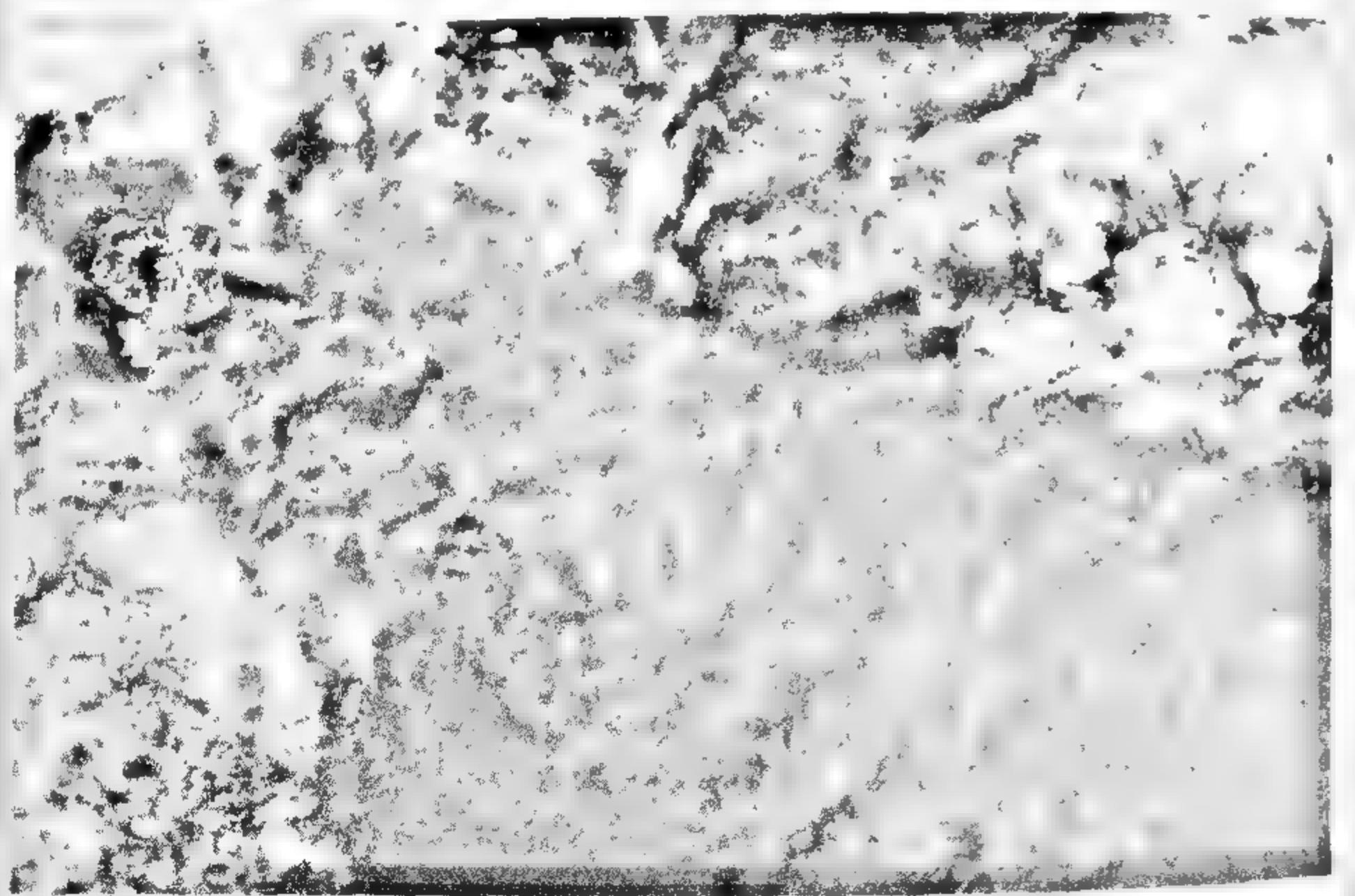
La historia nos ha demostrado el poder destructivo que pueden tener los volcanes, destacando los efectos devastadores provocados por el Vesubio, situado al sur de Italia, cuya erupción

LA AMENAZA DE EYJAFJALLAJÖKULL

Entre el 15 y el 20 de abril de 2010, el tráfico aéreo mundial sufrió un auténtico caos como consecuencia de la entrada en erupción del volcán Eyjafjallajökull, situado en Islandia. La gigantesca nube de cenizas y tefra emitida a la atmósfera durante aquella erupción explosiva alcanzó una altura próxima a los 9 000 m, extendiéndose con rapidez debido a las corrientes atmosféricas. En consecuencia, el espacio aéreo del norte de Europa se vio interrumpido, y miles de vuelos tuvieron que ser cancelados o desviados a otros aeropuertos, ante la posibilidad de que las aeronaves se vieran afectadas por FOD (acrónimo empleado en el ámbito aeroespacial, que significa Daño por Objeto Externo).

La prioridad: alejar a los aviones del peligro

A medida que la columna volcánica se elevaba y expandía en la atmósfera, aumentaba considerablemente el riesgo de que alguna aeronave sufriera daños por el impacto de las partículas volcánicas en sus turbinas. Las imágenes en tiempo real ofrecidas por los satélites de observación terrestre permitieron a los científicos pronosticar la evolución de aquella nube volcánica, y así desviar de su ruta a las aeronaves que se encontraban próximas a ella. Sin estos ingenios en órbita terrestre, habría sido imposible establecer de manera efectiva un perímetro de seguridad en los corredores de tráfico aéreo, factor que habría aumentado significativamente las probabilidades de que alguna aeronave sufriera incidentes de gravedad en vuelo.



La erupción del volcán islandés Eyjafjallajökull, captada por el satélite EO-1 de la NASA el 13 de mayo de 2010.

en el año 79 de nuestra era provocó la emisión a la atmósfera terrestre de ingentes cantidades de roca y cenizas, y la generación de *flujos piroclásticos* (torrentes de partículas y gas volcánico a muy altas temperaturas) que descendieron por las laderas del volcán a centenares de kilómetros por hora, sepultando a la popular ciudad de Pompeya y acabando con la vida de un importante número de habitantes de aquella localidad romana. Encuentramos ejemplos más recientes de estos efectos destructivos en las erupciones del Monte Santa Elena (situado en el estado de Washington, Estados Unidos), el 18 de mayo de 1980, que culminó con el colapso de la ladera norte del volcán, y en la del Nevado del Ruiz (situado en Tolima, Colombia) en 1985, cuyos flujos piroclásticos provocaron la tristemente conocida como tragedia de Armero, en la que fallecieron 23 000 personas que habitaban en dicho pueblo así como en el vecino Chinchiná.

Al igual que los movimientos sísmicos, las erupciones volcánicas provocan deformaciones en la superficie terrestre derivadas del movimiento del terreno y de los cambios de presión bajo ella, las cuales son fácilmente detectables desde el espacio. Las observaciones sistemáticas por satélite en este sentido permiten determinar patrones exclusivos del vulcanismo, lo que contribuye a profundizar en el conocimiento de la evolución de los volcanes y a predecir sus posibles comportamientos, una información cuya aplicación es de vital importancia en los sistemas de alerta y protección de la población.

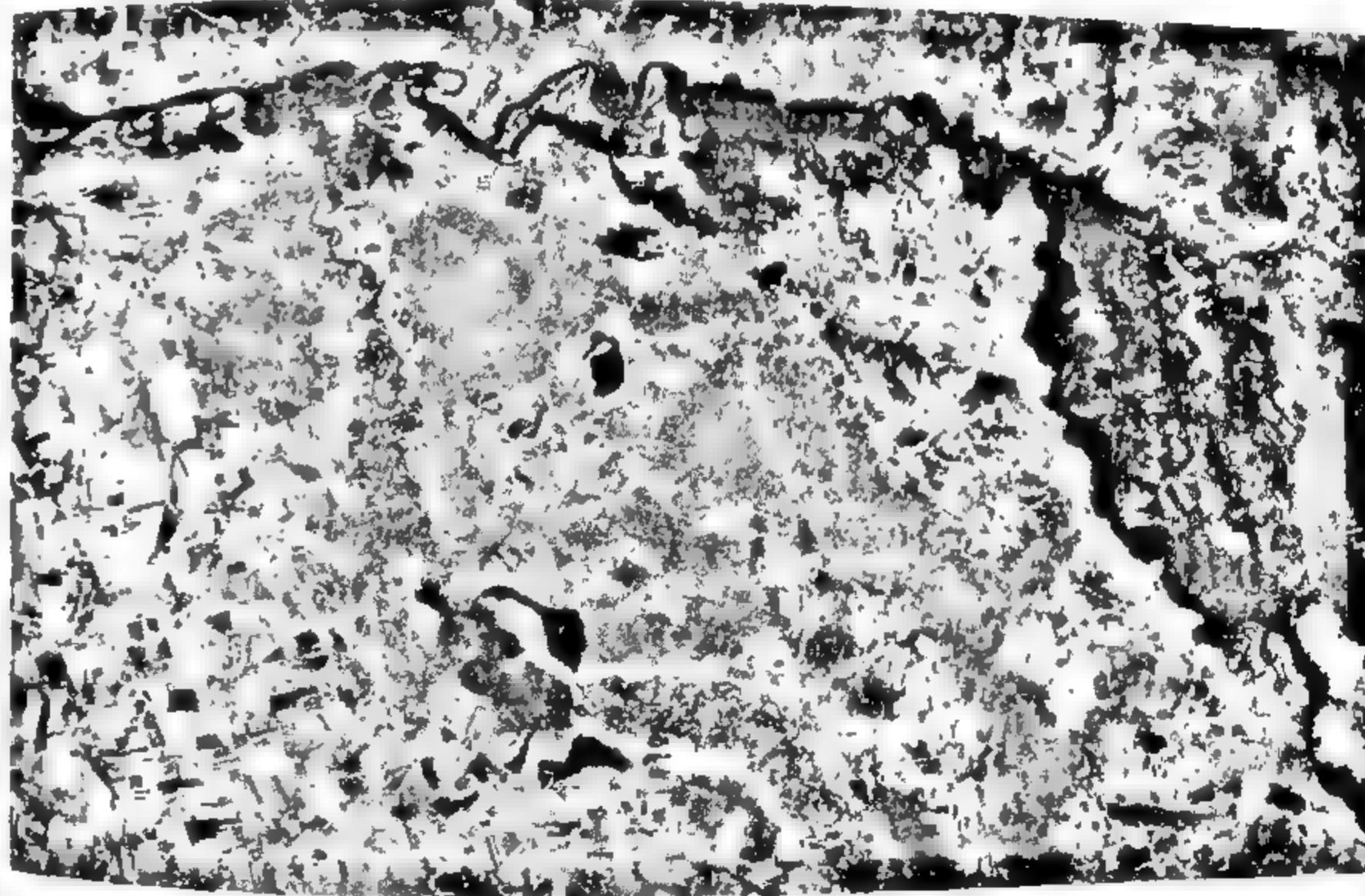
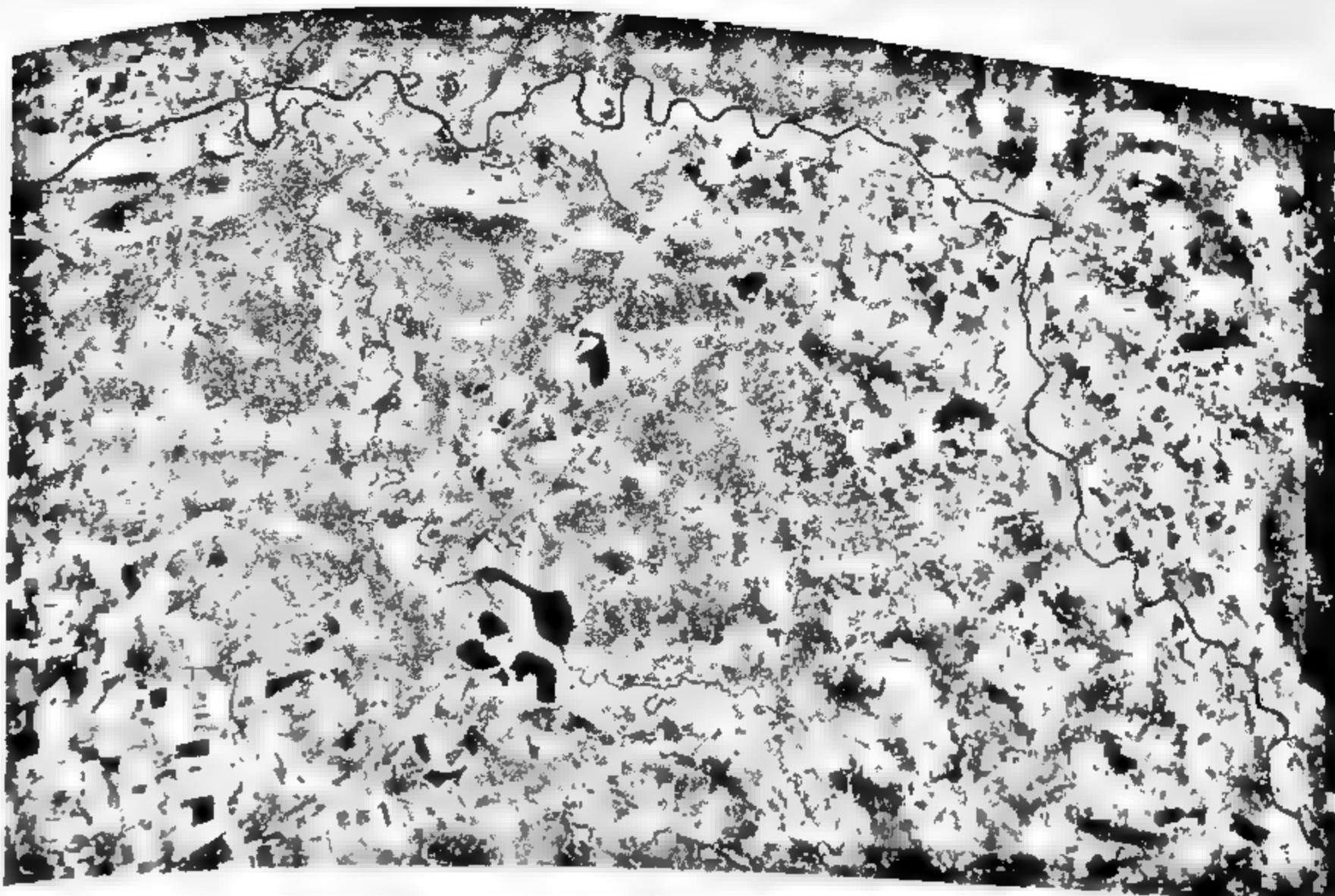
CUANDO LA TIERRA SE SATURA

Por lo general, cuando llueve, el agua es absorbida de manera rápida por la superficie terrestre. Una parte es filtrada al nivel freático, mientras otra es conducida mediante escorrentía a los ríos para desembocar posteriormente en el mar. Sin embargo, cuando las precipitaciones son intensas y la tierra se satura de agua, esta no es capaz de absorberla. Es entonces cuando tienen lugar las inundaciones, las cuales pueden tener efectos devastadores. Se trata de un problema que incide cada vez más sobre la

población, debido, entre otras cosas, al crecimiento del número de asentamientos humanos, y a la circunstancia de que estos se sitúan, principalmente, en lugares próximos a los ríos, dado que el agua es un recurso esencial para la vida. La construcción de núcleos de población sobre cauces de antiguos ríos, o el desvío de estos de forma artificial para la construcción de edificaciones, han agravado aún más los efectos de las inundaciones.

A finales de noviembre de 2016, diversas localidades al norte de Costa Rica se vieron inundadas a causa de las intensas precipitaciones que la tormenta tropical Otto dejó a su paso por aquel país. Se trataba de un fenómeno poco usual, dado que desde el año 1851 el país no había sufrido el paso de ningún huracán ni tormenta tropical. Además de las inundaciones, la región sufrió corrimientos de tierra y lodo dado que el terreno se encontraba altamente saturado de agua. Estos fenómenos causaron varios muertos y la evacuación de más de 6000 personas. Los satélites Sentinel 1B de la ESA y RADARSAT 2 de la CSA captaron imágenes de la zona afectada entre el 28 y el 30 de noviembre de 2016. La combinación de los datos obtenidos permitió conocer el alcance de las inundaciones, que afectaron especialmente a la localidad de Upala.

A diferencia del continente americano, Europa no se encuentra expuesta a los efectos de los huracanes ni de las tormentas tropicales. Sin embargo, las borrascas más profundas producen importantes inundaciones, que en ocasiones derivan asimismo en la pérdida de vidas humanas. A mediados de 2013, las intensas precipitaciones provocadas por el paso de un frente tormentoso muy activo sobre Europa Central provocaron importantes inundaciones en Alemania, República Checa y Austria. Los efectos también se sintieron en otros países como Suiza, Eslovaquia, Serbia, Polonia y Hungría. El río Elba, a su paso por la localidad alemana de Dresde, alcanzó una altura próxima a los 9 m. Los daños se extendieron también a la cuenca del Danubio, en lo que se calificó como el mayor desastre sufrido en Europa Central en la última década. El 6 de junio, el satélite Terra de la NASA, mediante su instrumento MODIS (acrónimo de Espectro-radiómetro Generador de Imágenes de Resolución Modera-



En el año 2002, la localidad alemana de Dresden sufrió importantes inundaciones. Estas imágenes, captadas el 14 de agosto de 2000 (arriba) y el 20 de agosto de 2002 por el instrumento ETM+ del satélite Landsat 7, sirven para determinar el alcance de las inundaciones. El agua se muestra en color negro. En condiciones ordinarias, el río aparece como una delgada línea sinuosa, prácticamente imperceptible (arriba). En cambio, con el desbordamiento y las inundaciones, la masa de agua pasa a ser claramente visible y en algunos sectores parece que en vez de un tramo de río existe un lago.

da), obtuvo una fotografía del río Elba. La imagen era fruto de una combinación de instantáneas tomadas en los rangos visible e infrarrojo del espectro, dando como resultado una fotografía de gran contraste a partir de la cual se pudo conocer con detalle la magnitud y alcance de las inundaciones. No era la primera vez que se usaba la observación desde el espacio para evaluar la envergadura de inundaciones en la zona de Dresde. En 2002, el satélite Landsat 7 realizó este trabajo (véanse las imágenes de la página anterior).

Como se ha dicho anteriormente, la saturación de agua, además de provocar inundaciones, hace que el terreno se haga propenso a sufrir desplazamientos y corrimientos, con consecuencias que, a veces, pueden ser mortales. Las intensas precipitaciones registradas durante el monzón en el año 2010 saturaron rápidamente la tierra en el condado de Zhouqu, provincia de Gansu (China), una región densamente poblada. Las torreneras concentraron miles de ramas, troncos y otros escombros, formando diques en torno a los cuales se fueron acumulando importantes masas de agua. El 8 de agosto, la presión ejercida por estas terminó destruyendo los diques, provocando un aluvión de barro que descendió por las montañas, sepultando pueblos enteros. A través de su Captador Avanzado de Imágenes del Terreno (ALI en su acrónimo en inglés), el satélite EO-1, lanzado por la NASA a una órbita polar heliosincrónica el 21 de noviembre de 2000, obtuvo una instantánea el 7 de septiembre de 2010 en la que se apreciaban los efectos de aquel deslizamiento de barro, que acabó con la vida de 1 500 personas e hirió a más de 1 200. Otras 300 desaparecieron sin dejar rastro, y más de 1 700 personas tuvieron que ser evacuadas y albergadas en escuelas.

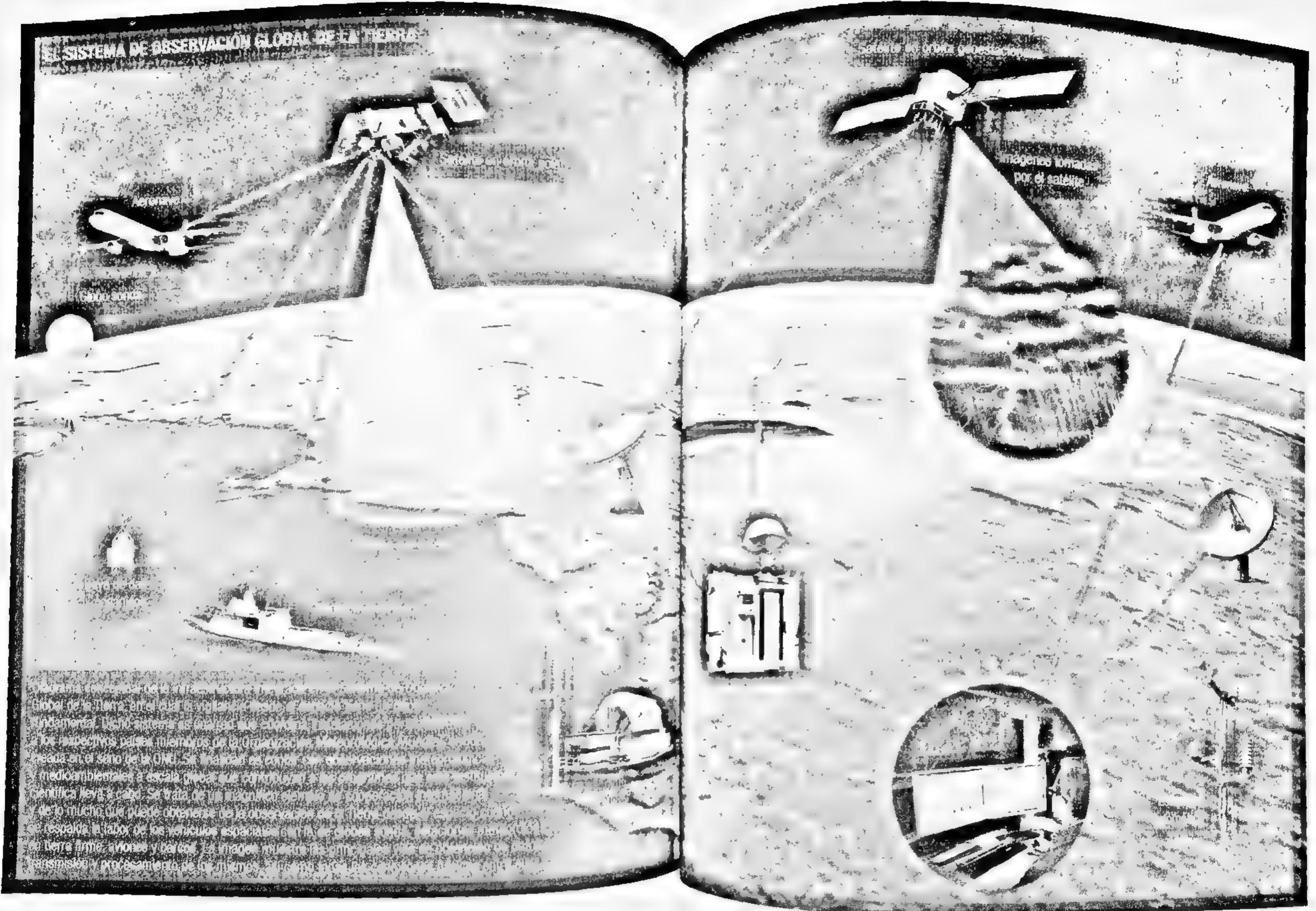
Además de generar fotografías de los efectos causados por las inundaciones, los satélites son capaces de elaborar detalladas imágenes tridimensionales, a partir de las cuales se puede determinar qué áreas de una región son susceptibles de sufrir inundaciones y aluviones, lo que supone una información muy valiosa para la toma de decisiones en el marco de los protocolos de evacuación de la población, y también en lo tocante al diseño de las ciudades.

UNIDOS FRENTE A LOS DESASTRES NATURALES

Como ha quedado evidenciado a lo largo de este capítulo, las catástrofes naturales no son fenómenos aislados, y tienen lugar con bastante periodicidad, causando miles de muertos al año. Se hace, por tanto, necesario el establecimiento de un sistema de seguimiento continuo de nuestro planeta integrado por una gran red de satélites en órbita terrestre (véase la imagen de las págs. 130-131), dotados de los instrumentos necesarios para la obtención de imágenes independientemente de las condiciones meteorológicas y de iluminación, una empresa cuya envergadura hace imprescindible la colaboración internacional. Por este motivo, más de una decena de organismos espaciales de todo el mundo firmaron la llamada Carta Internacional «El espacio y las grandes catástrofes», un acuerdo que entró en vigor en noviembre de 2000 y que favorece el trabajo conjunto y la coordinación de los medios destinados a la observación espacial de varios países. La Carta define el protocolo mediante el cual se ponen los medios técnicos y científicos necesarios a disposición de las autoridades en caso de sobrevenir una catástrofe natural.

El protocolo entra en funcionamiento a requerimiento de los servicios de protección civil en el momento en que tenga lugar un desastre que suponga un riesgo para la vida humana y/o del que puedan derivarse daños importantes en bienes materiales. El procedimiento establecido es el siguiente:

1. En el momento en que se desencadena un desastre, un usuario autorizado, perteneciente a un organismo de gestión de emergencias o Naciones Unidas, establece comunicación con la Oficina de Control de la Carta, operativa las 24 horas del día, solicitando imágenes tomadas por satélite de la zona afectada.
2. El operador de la Oficina de Control transmite la solicitud recibida al agente que, en ese momento, se encuentra de guardia para atender casos de urgencia.



Sondeando los secretos ocultos de la Tierra

3. El agente establece un plan de obtención de imágenes, que posteriormente comunica al responsable del proyecto y a las agencias espaciales.
4. Las agencias espaciales movilizan todos sus recursos para responder de manera rápida y efectiva a la solicitud de ayuda.
5. Los satélites con mejor dotación instrumental y más próximos al lugar del desastre obtienen las imágenes requeridas.
6. Las imágenes y datos transmitidos por los satélites son procesados e interpretados, y posteriormente enviados al usuario solicitante de los mismos.

OTRAS CATÁSTROFES

No solo las fuerzas de la naturaleza ocasionan desastres. Hasta ahora hemos hablado de catástrofes provocadas por estas fuerzas, pero por desgracia la mano del hombre está detrás de otros muchos episodios de destrucción, y en tales casos la observación de las zonas afectadas desde el espacio también es de gran utilidad. Los incendios forestales son muy comunes, y es frecuente que los más graves sean fotografiados con bastante facilidad desde el espacio. Las peores mareas negras provocadas por vertidos de petróleo en el mar han sido objeto de un extenso seguimiento desde el espacio en épocas recientes, como por ejemplo la del accidente de la plataforma petrolera Deepwater Horizon acaecido en el golfo de México en 2010 y la provocada por el accidente del buque petrolero Prestige en 2002 cerca de la costa noroeste de la península ibérica.

Los satélites no solo nos han ofrecido una perspectiva global de los complejos fenómenos que tienen lugar en nuestro planeta, sino que han determinado con precisión su forma, e incluso se han adentrado en su estructura interna, proporcionándonos una visión insólita de los misterios que cobija.

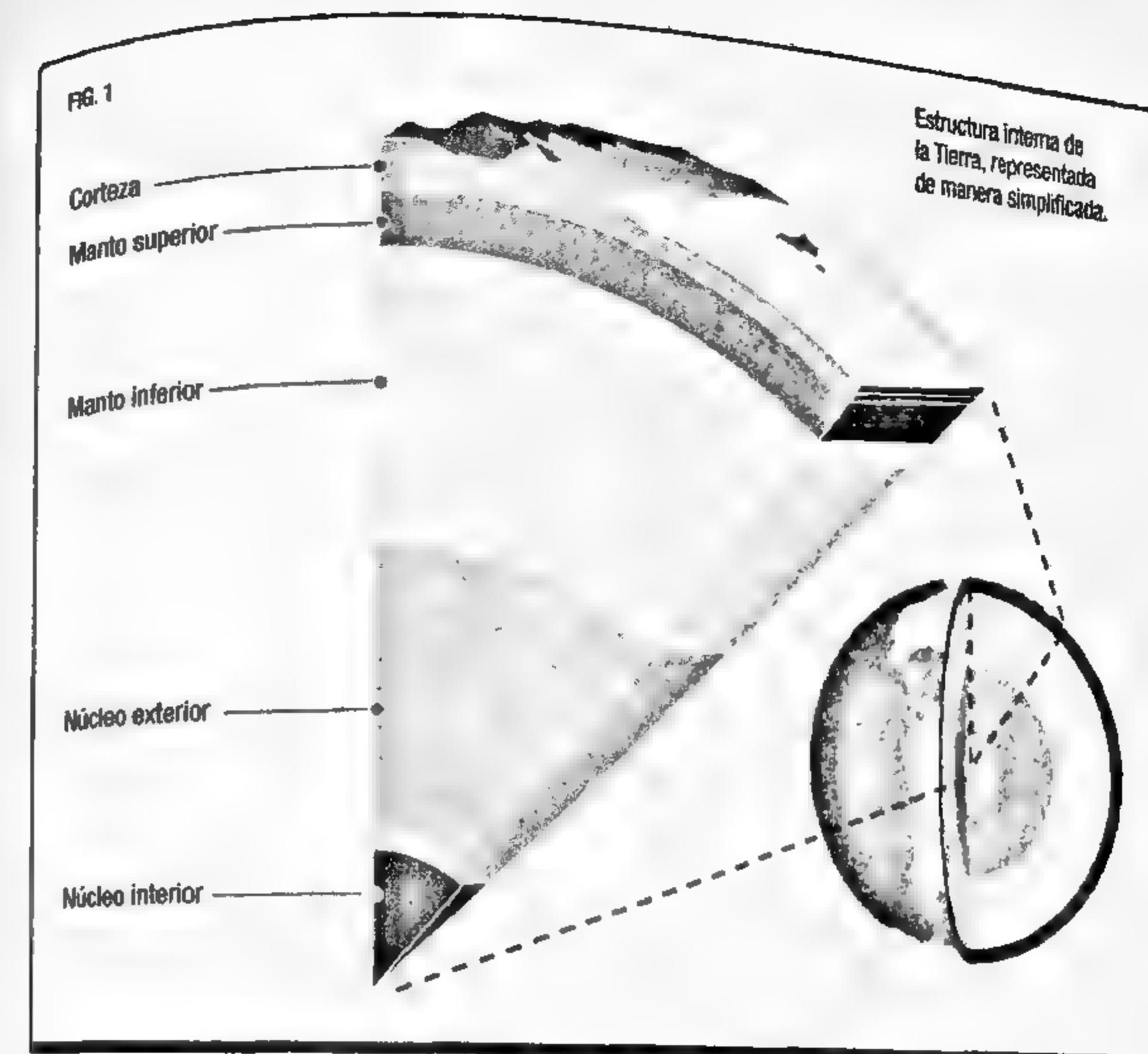
El Sol, los planetas y las lunas de nuestro sistema solar tuvieron su origen hace aproximadamente 5 000 millones de años a partir de un fenómeno llamado *acreción*. Antes del nacimiento de estos astros, las regiones que hoy orbitan estaban ocupadas por una gran nube de gas y polvo, denominada *nebulosa protosolar*, la cual recibió el impacto de una onda expansiva originada tras el estallido de una antigua estrella cercana. Aquella onda provocó que la nebulosa comenzase a girar y a compactarse, adquiriendo la forma de un disco. El gas y el polvo que la componían empezó a concentrarse por acción de la gravedad, originando pequeños cuerpos que, al ir ganando masa, adquirieron paulatinamente mayor capacidad para atraer nuevas partículas de gas y polvo. Como resultado, y tras un proceso que duró decenas de millones de años, nacieron los astros que hoy integran nuestro sistema solar.

En el caso de la Tierra y de otros planetas y lunas rocosos como ella, la acreción tuvo lugar a partir de pequeñas partículas de polvo que se concentraron dando lugar a diminutas rocas. Estas, al colisionar de forma sucesiva, formaron cuerpos de cada vez mayor envergadura, llamados asteroides, grandes rocas es-

paciales, de tamaños que oscilaban entre varias decenas de metros y centenares de kilómetros, que, a su vez, colisionaron entre sí, dando como resultado astros tan grandes que la gravedad les confirió forma esférica.

La Tierra es, en esencia, producto de la colisión de millones de asteroides y de otro tipo de cuerpos constituidos principalmente por hielo, a los que llamamos cometas. En su conjunto, estos objetos fueron dotando a nuestro planeta de todos y cada uno de los materiales de los que hoy en día se compone. La gravedad se fue encargando de ir ordenando dichos materiales en función de su densidad. Así, los más pesados, como el hierro y el níquel, se concentraron en la región más interna del planeta, mientras que los menos densos, como los silicatos y los óxidos, se situaron en cotas más superficiales. Este proceso de ordenación es conocido por el término *diferenciación*.

La parte más interna de la Tierra, el *núcleo*, que, como decíamos, está constituido principalmente por hierro y níquel, aún conserva parte del calor generado durante el proceso de formación del planeta. Su enfriamiento se ha ralentizado debido a las presiones tan elevadas que se registran en esta región. El núcleo está dividido en dos regiones, llamadas *núcleo interior* y *núcleo exterior*. La primera de ellas está formada por hierro y níquel, probablemente en estado sólido, mientras que la segunda está constituida por los mismos materiales, pero en estado líquido. Este último genera corrientes eléctricas y, con ellas, un campo magnético alrededor de la Tierra que conocemos bajo el nombre de *magnetosfera*, y que actúa como un escudo de protección contra buena parte de la radiación cósmica y solar. La figura 1 muestra de manera simplificada las principales capas de la Tierra. Los estudios realizados en los últimos 150 años han determinado que la magnetosfera ha perdido un 15% de su fuerza, de lo que se infiere que este campo magnético está sufriendo una paulatina debilitación, y puede encontrarse en los albores de un proceso de inversión, un fenómeno natural que ya ha ocurrido en otras ocasiones, y que ha podido determinarse a partir del estudio del *paleomagnetismo*, es decir, del magnetismo en rocas antiguas. Tales estudios apuntan a que en los últimos 20 millo-



nes de años, el campo magnético de la Tierra se ha invertido en intervalos de entre 200 000 y 300 000 años, habiendo transcurrido 780 000 años desde la última inversión.

LA LLEGADA DE LOS SATÉLITES GEODÉSICOS

Los sofisticados instrumentos situados a bordo de los satélites permiten conocer la forma real de la Tierra, sondear su estructura interna y estudiar sus campos gravitatorio y magnético, proporcionándonos información que sería imposible obtener a partir de estudios de campo. Todos estos conocimientos se engloban en una disciplina denominada geodesia.

Antes de la Era Espacial, los métodos accesibles para el estudio geodésico eran el lanzamiento de globos y cohetes, las observaciones de la Luna durante fenómenos celestes como eclipses solares y ocultaciones estelares, y el empleo de aviones como métodos de triangulación. Estas técnicas presentaban una serie de dificultades, entre ellas la limitación de la distancia entre puntos de triangulación, la inexistencia de una solución tridimensional directa y

Nuestra especie necesita, y merece, una ciudadanía con mentes bien despiertas y una comprensión básica de cómo funciona el mundo.

CARL SAGAN

la refracción atmosférica. La llegada de los satélites resolvió de manera efectiva tales problemas.

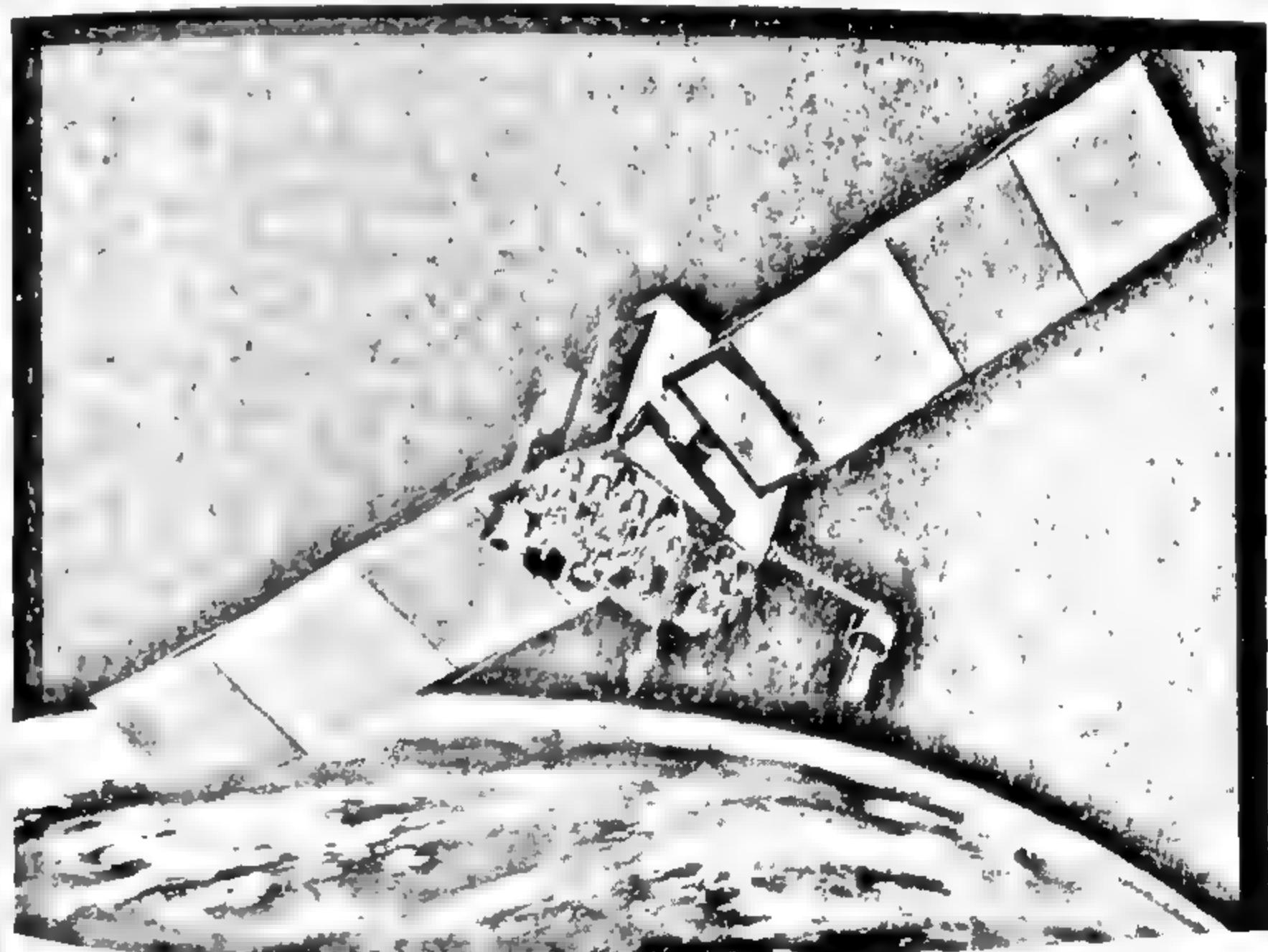
Existen tres métodos mediante los cuales se puede utilizar un satélite con propósitos geodésicos. El primero de ellos es el llamado «tierra-espacio», y consiste en la observación del propio satélite desde estaciones de seguimiento en la superficie terrestre. Este método implica la utilización de sistemas ópticos, instrumentación láser de medición de la distancia, técnicas basadas en el efecto *Doppler* o Sistemas Globales de Navegación por Satélite (GNSS). El segundo es el método «espacio-tierra», y se basa en el empleo de un instrumento a bordo de un satélite para la observación de la superficie terrestre. Ello puede lograrse mediante cuatro técnicas: la altimetría láser, la altimetría por radar, la gradiometría gravitatoria y la utilización de radares de apertura sintética. El tercero es el conocido como método «espacio-espacio», y consiste en que un primer satélite realice el seguimiento de un segundo en órbita terrestre. Existen tres técnicas para desarrollar este método. La primera de ellas es la utilización de un satélite en una órbita de gran altitud como repetidor de las estaciones terrestres, permitiendo así la observación de vehículos situados en órbitas más bajas durante períodos en que esta no pueda realizarse de manera directa. La segunda se basa en el seguimiento mutuo entre satélites situados en una misma órbita baja, al objeto de poder determinar las perturbaciones gravitatorias que afectan a esta. El método «espacio-espacio» también puede realizarse a través de satélites de posicionamiento global.

LOS SISTEMAS GLOBALES DE NAVEGACIÓN POR SATÉLITE

Conocidos por su acrónimo inglés GNSS, estos sistemas nacieron en la década de 1960 en el ámbito militar, con programas como los Timation, Transit, Triad y NAVSTAR de la Armada y la Fuerza Aérea de Estados Unidos, y los GLONASS soviéticos, con objeto de determinar la posición de instalaciones y vehículos militares, aunque, con el transcurso de los años, estos sistemas trascendieron al ámbito civil, existiendo actualmente tres sistemas: el GPS NAVSTAR estadounidense, el GLONASS ruso y el Galileo europeo. Asimismo, otras potencias están desarrollando sistemas análogos, como el chino BeiDou, el indio NAVIC y el japonés QZSS. Su uso se extiende a multitud de áreas, desde la reorganización del tráfico, la búsqueda y rescate de personas accidentadas.

Un cambio radical en la forma de entender el geoide

Aunque actualmente estamos acostumbrados a asociar los GNSS con herramientas para conocer nuestra localización en la superficie terrestre, estos satélites son capaces igualmente de monitorizar en tiempo real el movimiento de las placas tectónicas y los cambios de posición del eje de rotación del planeta con una precisión centimétrica. Los datos sirven para determinar muchos de los procesos que tienen lugar tanto en la superficie como en el interior de la Tierra.



Impresión artística del satélite GPS Navstar 2F.

Los primeros documentos que pusieron de manifiesto la utilidad del lanzamiento de satélites para estudios geodésicos se remontan a 1956, es decir, un año antes del lanzamiento del Sputnik. Muy poco tiempo después, y a partir de ingenios como el Sputnik 2 (1957), el Explorer 1 (1958), los Transit y el Echo 1 (estos últimos lanzados en 1960), se pudieron realizar algunos estudios en este campo, que apuntaban a que el globo terráqueo se encontraba ligeramente achatado por sus polos. No obstante, la geodesia espacial no dio comienzo como tal hasta el 31 de octubre de 1962, fecha en que el ANNA 1B, primer satélite diseñado exclusivamente para tales objetivos, alcanzó la órbita terrestre. El ANNA (acrónimo en inglés de Ejército, Armada, NASA y Fuerza Aérea) era un proyecto fruto de la colaboración entre el Departamento de Defensa, la NASA y otras agencias civiles. Este ingenio portaba cámaras ópticas, un transpondedor denominado SECOR (acrónimo en inglés de Comparación Secuencial de la Distancia) y un radar Doppler. Las cámaras proporcionaban al radar información sobre la posición con una precisión próxima a los 20 m. Los instrumentos a bordo del ANNA 1B también permitieron medir la fuerza y dirección del campo gravitatorio terrestre.

En el marco del programa Explorer se lanzaron asimismo ingenios con objetivos geodésicos. El 6 de noviembre de 1965 partía al espacio el Explorer 29, bautizado con el nombre de GEOS-A (acrónimo de Satélite Experimental Oceánico y Geodinámico). Junto al Explorer 36 (GEOS-B), lanzado el 11 de enero de 1968, estos vehículos tenían la misión de integrar los datos obtenidos en un sistema único, vinculándolos al centro de masa de la Tierra, de modo que las localizaciones podían determinarse en un sistema de coordenadas tridimensionales con una precisión de 10 m. Se trataba de satélites prácticamente idénticos, formados por un armazón octogonal con una pirámide truncada de seis caras situada en su parte superior.

La tecnología láser fue empleada por primera vez en combinación con los satélites en el marco del programa LAGEOS (siglas, en inglés, de Satélite Geodinámico Láser), cuyo primer representante, LAGEOS 1, fue lanzado el 4 de mayo de 1976. Se

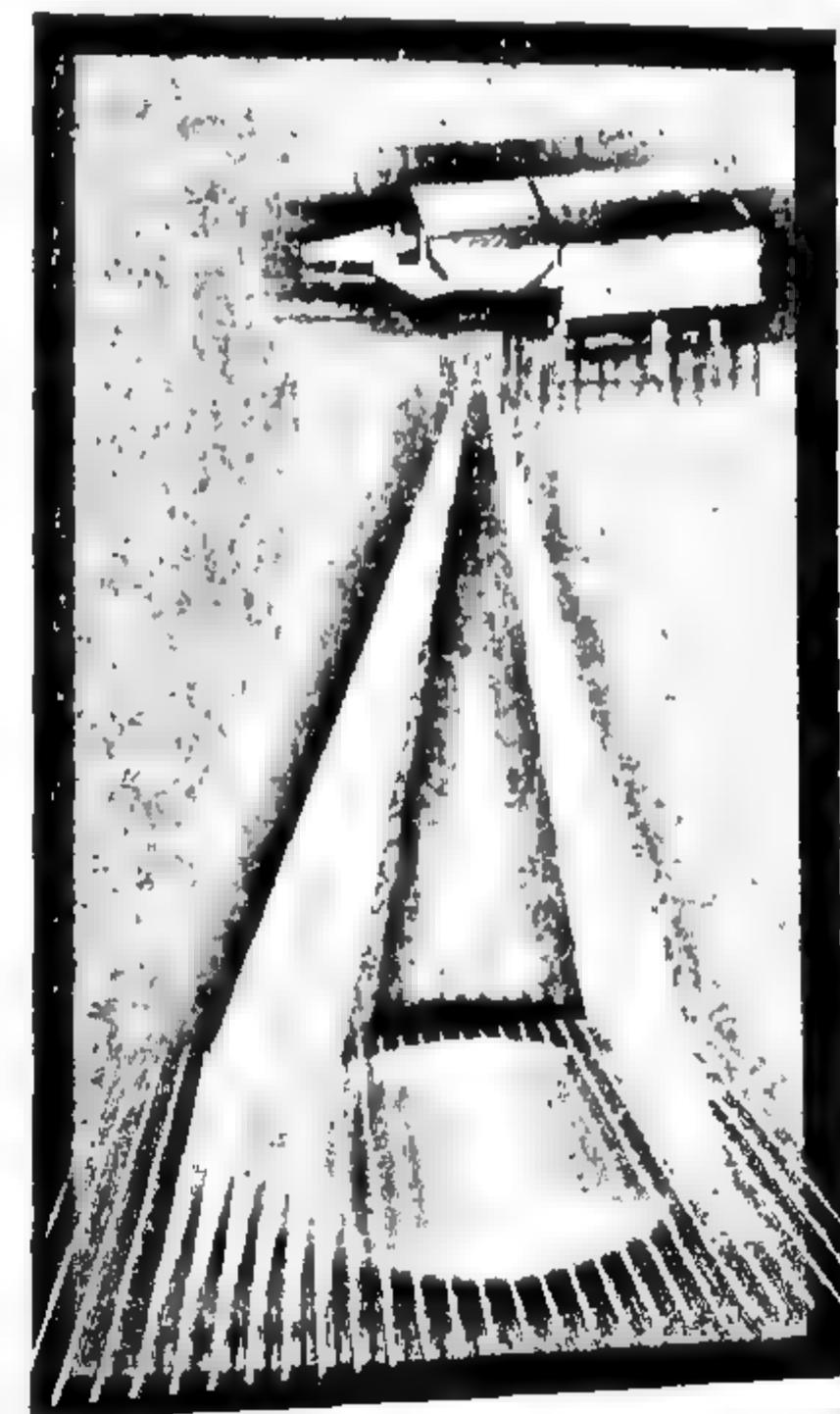
EL EFECTO DOPPLER DESDE EL ESPACIO

El efecto Doppler fue descubierto por el físico austriaco Christian Andreas Doppler en el siglo XIX, y describe los cambios en la frecuencia de las ondas emitidas por un cuerpo en movimiento con relación a un observador. A partir del efecto Doppler, se puede determinar la distancia y el movimiento de los cuerpos. El satélite ANNA 1B demostró la utilidad de este efecto con fines geodésicos. Al igual que ocurre con las ondas sonoras, que se comprimen o se expanden en función del acercamiento o alejamiento de la fuente de emisión con respecto al observador, el efecto Doppler puede advertirse en las ondas de radio, como se ilustra en la figura. El radar del ANNA 1B emitía una señal no modulada de forma continua en una misma frecuencia, la cual era recibida en las estaciones de seguimiento mostrando un desplazamiento con respecto a la frecuencia original, como consecuencia de la velocidad relativa del satélite con relación a dichas estaciones. A partir de la señal recibida, una sola estación de seguimiento era capaz de determinar el periodo orbital del satélite, la distancia de este en el momento de su máxima aproximación y su velocidad radial con relación a dicha estación. La recepción de la señal por parte de tres o más estaciones de seguimiento permitía, además, calcular los parámetros orbitales del satélite. La información, en su conjunto, servía para determinar las perturbaciones gravitatorias sufridas por el vehículo a lo largo de su órbita y, con ellas, estudiar las características del campo de gravedad de nuestro planeta.

Las grandes ventajas del Doppler

El seguimiento mediante Doppler ha resultado ser una de las técnicas más efectivas en el campo geodésico, dado que se trata de un sistema pasivo (las estaciones de seguimiento no necesitan emitir señales, solo las reciben), los datos obtenidos se encuentran en formato digital, y las frecuencias empleadas permiten un seguimiento de los satélites en condiciones diurnas y nocturnas, independientemente de la meteorología reinante en el entorno de las estaciones de seguimiento. Estas ventajas han propiciado que desde el ANNA 1B se haya lanzado un amplio número de satélites con instrumentación Doppler.

En su órbita, el satélite se acerca al sector de la superficie que tiene delante (representado a la izquierda) y se aleja del que tiene atrás (representado a la derecha). Esto hace que los haces de radar proyectados sobre los sectores sean captados desde estos con cambios de frecuencia por el efecto Doppler.



trataba de un satélite pasivo de forma esférica, que no portaba instrumentación alguna, pero que estaba dotado de 426 retrorefletores, lo que le daba el aspecto de una pelota de golf gigante. El disparo de haces de láser hacia sus retrorefletores desde estaciones situadas en diferentes partes del planeta permitía a estas medir la separación existente entre ellas, una información de gran utilidad para determinar las características del geóide terrestre (morfología real de referencia de nuestro planeta) y el movimiento de las placas tectónicas. Junto a un segundo satélite, lanzado el 22 de octubre de 1992 por el transbordador Columbia durante la misión STS 52, los LAGEOS se han convertido en algunos de los ingenios a través de los cuales se pueden determinar posiciones con la mayor precisión posible. Dada la gran estabilidad y regularidad de la órbita del primero de ellos, se calcula que su entrada en la atmósfera terrestre por acción de la gravedad de nuestro planeta no tendrá lugar hasta dentro de unos 8,4 millones de años, motivo por el cual se ha constituido como una verdadera cápsula del tiempo. El satélite porta una placa diseñada por Carl Sagan, con datos sobre la época en que fue lanzado, destinada a la generación de humanos que entonces residirán en la Tierra.

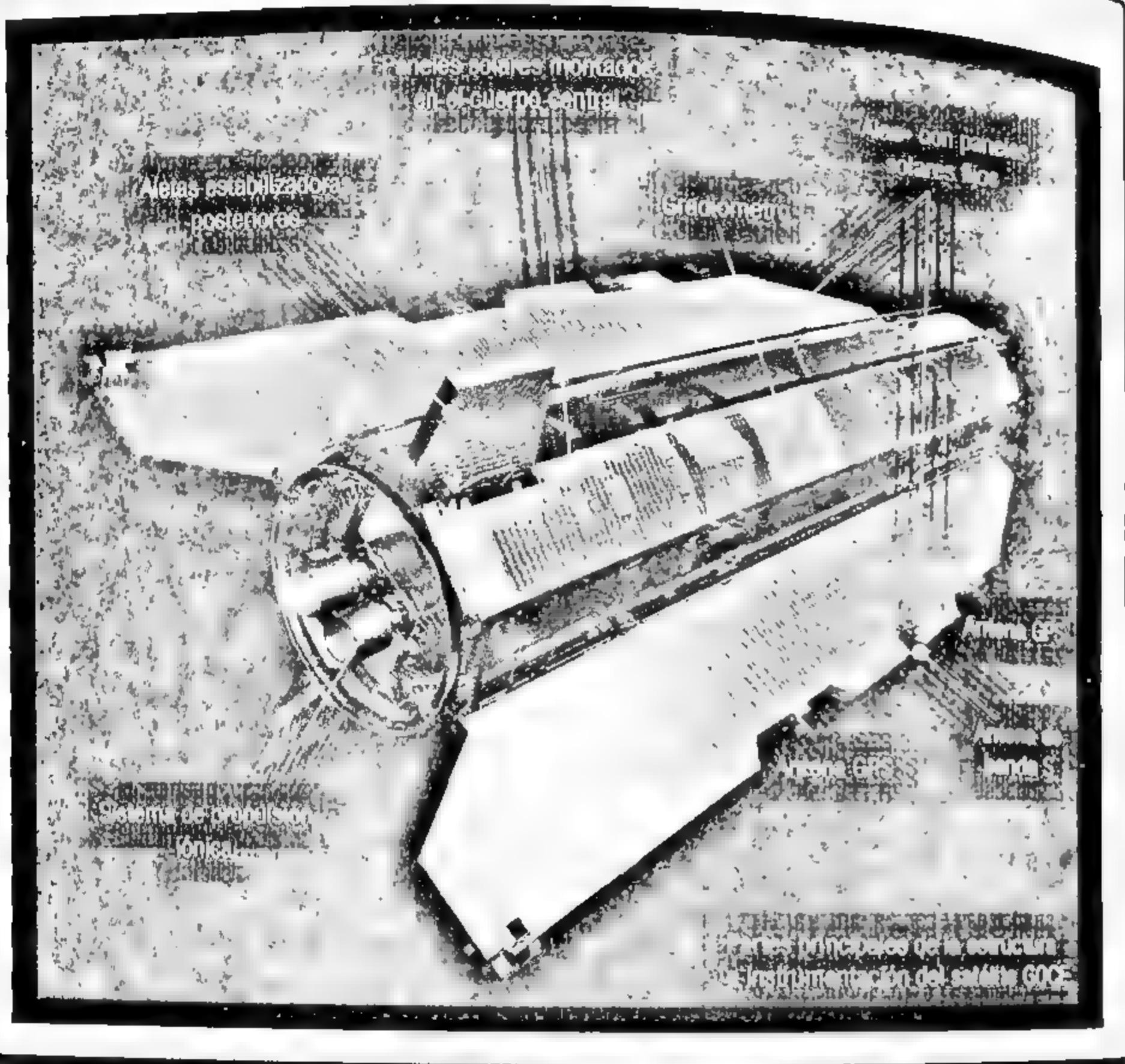
GEODESIA ESPACIAL DE ÚLTIMA GENERACIÓN

A partir de los datos obtenidos mediante el ANNA 1B y otros satélites geodésicos lanzados en la última mitad del siglo XX, los científicos advirtieron la existencia de significativas alteraciones en sus respectivas órbitas, generadas esencialmente por el campo de gravedad de nuestro planeta. Estas variaciones están causadas principalmente por el movimiento de las masas de agua formadas por los océanos, las placas de hielo y el agua situada en niveles subterráneos. Al objeto de poder medir con mayor detalle estas perturbaciones, durante la primera década del siglo XXI se puso en órbita una nueva generación de máquinas dotadas de instrumentos diseñados específicamente para obtener lecturas precisas de tales alteraciones.

El 17 de marzo de 2002 partían desde el cosmódromo ruso de Plesetsk dos satélites pertenecientes al programa GRACE (acrónimo de Experimento Climático y de Recuperación Gravitatoria), fruto de la colaboración internacional entre la NASA y el DLR. Estos dos satélites, que fueron bautizados con los apodos de Tom y Jerry en alusión a los populares personajes de una serie de dibujos animados, fueron colocados en una órbita terrestre baja casi polar, manteniendo una distancia mutua de 220 km. Desde aquella posición, comenzaron a generar mensualmente mapas de anomalías gravitatorias con una precisión mil veces superior a la conseguida por satélites lanzados previamente, de la que se vieron beneficiadas diversas áreas del conocimiento humano, como la oceanografía, la geografía, la glaciología (estudio de los glaciares), la hidrología y, además, todas aquellas disciplinas ligadas al estudio de los fenómenos que influyen en el clima terrestre.

Realizando un seguimiento mutuo en órbita terrestre baja a través de sus respectivos sensores de medición de distancia y acelerómetros, los satélites del programa GRACE son capaces de advertir sutiles cambios en el espacio que les separa con una precisión de 10 micrómetros, o lo que es lo mismo, una décima parte del grosor de un cabello humano. Ello les ha permitido detectar las más discretas variaciones en el campo gravitatorio de nuestro planeta causadas por procesos geofísicos, entre ellos los terremotos. En este sentido, los satélites GRACE pudieron determinar desplazamientos en la corteza terrestre provocados por el intenso seísmo que, en diciembre de 2004, provocó un devastador tsunami que asoló la costa de varios países a lo largo y ancho del océano Índico. Del mismo modo, gracias a los datos proporcionados por estos ingenios, se ha podido descubrir la existencia de un cráter de 480 km de diámetro en la Tierra de Wilkes (Antártida), generado como consecuencia del impacto de un gran asteroide, que los científicos estiman tuvo lugar hace aproximadamente 250 millones de años.

Por su parte, la ESA puso en marcha la misión GOCE (figura 2) el 17 de marzo de 2009. GOCE son las siglas en inglés de Explorador del Campo Gravitatorio y Circulación Oceánica. Lanzado



desde el cosmódromo ruso de Plesetsk y situado en órbita polar heliosíncrona, este satélite estaba dotado de los instrumentos más sofisticados en aquel entonces, teniendo como misión principal investigar el campo gravitatorio terrestre y cartografiar el geoide con una resolución y precisión sin precedentes.

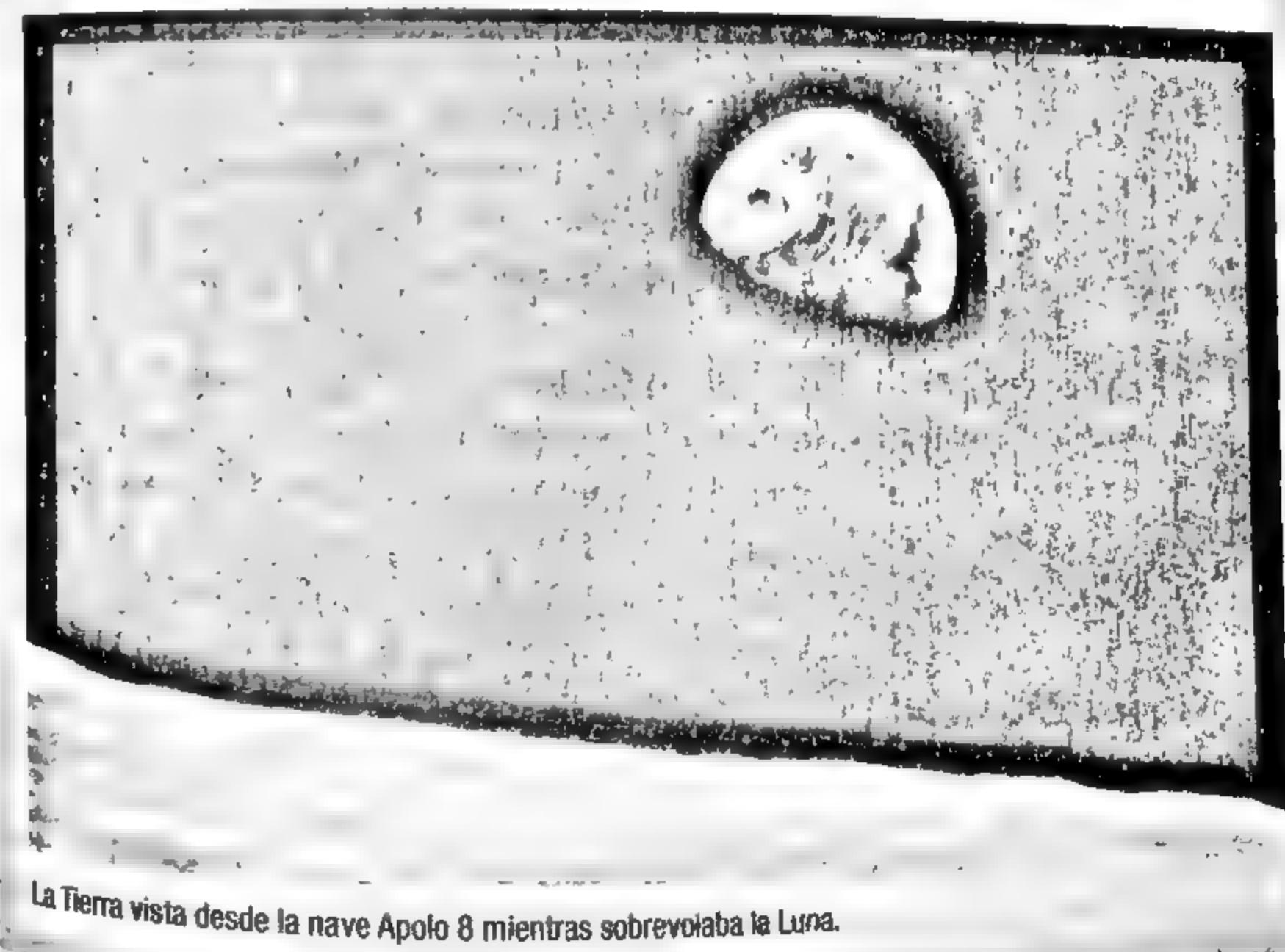
Las mediciones obtenidas por el GOCE se consiguieron gracias a un instrumento denominado Gradiómetro Electrostático Gravitatorio, que incorporaba seis acelerómetros de muy alta sensibilidad, montados por parejas a lo largo de tres ejes perpendiculares sobre una estructura de carbono-carbono ultra es-

¿QUÉ FORMA TIENE NUESTRO PLANETA?

En diciembre de 1968, los astronautas del Apolo 8, primera misión tripulada que orbitó la Luna, quedaron asombrados al ver cómo la Tierra emergía lentamente del horizonte selenita. Describieron nuestro planeta como una canica blanco-azulada, suspendida en la inmensa oscuridad del espacio. Sin embargo, nuestro planeta tiene una forma más compleja de lo que parece.

¿Esfera achatada, pera o patata?

Las mediciones realizadas previamente a la Era Espacial apuntaban a que nuestro planeta era una esfera ligeramente achatada por los polos. Los datos retornados por satélites como el Explorer 1 en 1958 indicaban que, más que una esfera, la Tierra tenía forma de pera. La respuesta definitiva vendría de manos de la nueva generación de satélites geodésicos, como los GRACE y el GOCE. Gracias a sus instrumentos de increíble precisión, nos han proporcionado una nueva visión de la Tierra, cuya morfología se asemeja más a la de una patata que a la de una pera o esfera achatada. Los datos de las variaciones gravitatorias obtenidos por el GOCE han permitido elaborar el modelo más preciso del geoide terrestre hasta la fecha, que sirve de base para efectuar, entre otras, medidas fiables de la circulación oceánica y de los cambios en el nivel del mar. Este modelo, además, contribuye a comprender mejor los procesos que tienen lugar bajo la corteza terrestre, como la física y la dinámica asociada a la actividad volcánica y a los terremotos.



La Tierra vista desde la nave Apolo 8 mientras sobrevolaba la Luna.

table. Estos instrumentos no medían la gravedad en sí, sino que detectaban los cambios gravitatorios registrados entre los pares de acelerómetros, distantes entre sí 50 cm. Los datos obtenidos por ellos permitieron producir el mapa gravitatorio de la Tierra

más preciso hasta la fecha, determinando con mayor exactitud las características del geoide terrestre, lo que contribuye a comprender mejor el comportamiento de los océanos y la atmósfera de nuestro planeta, ade-

más de establecer un modelo de referencia para medir y perfilar los cambios en el nivel del mar y en la circulación oceánica. Tras cuatro años en órbita, el GOCE finalizó su misión el 21 de octubre de 2013.

Levanté mi dedo pulgar y oculté con él todo el planeta Tierra.

NEIL ARMSTRONG

EINSTEIN TENÍA RAZÓN

En el año 1915, el físico Albert Einstein concluyó su teoría de la relatividad general, un trabajo que supuso toda una revolución en el ámbito científico. En ella, Einstein argumentaba que el espacio-tiempo se curvaba en presencia de masa y energía. Trasladando este postulado al ámbito espacial, un objeto, a medida que se aproximase a un planeta, entraría en una región donde el espacio-tiempo se curvaría y, en consecuencia, la trayectoria del cuerpo experimentaría algunos cambios, entre ellos una aceleración. Es lo que se conoce como efecto geodésico, donde dicha aceleración, que explicamos comúnmente como efecto de la fuerza de la gravedad, es en realidad fruto de la curvatura del espacio-tiempo. Existe además un segundo efecto que Einstein explicaba en el ámbito de su teoría, el llamado *arrastre de marco*, término que define la cantidad de espacio-tiempo que un cuerpo (por ejemplo, un planeta) es capaz de arrastrar al girar sobre sí mismo.

Estos postulados de la teoría de la relatividad general de Einstein chocaban de plano con la teoría de la *gravitación universal* de Isaac Newton, la cual argumentaba que el espacio-tiempo era

absoluto o fijo, y que la gravedad era una fuerza que, de algún modo, actuaba instantáneamente entre objetos, causando atracción mutua entre ellos. Por tanto, los efectos geodésico y de arrastre de marco no tenían cabida en la teoría de Newton.

Naturalmente, en aquel entonces no existía forma empírica de demostrar estos postulados. Sin embargo, todo cambió el 20 de abril de 2004, fecha en que fue lanzado a una órbita terrestre baja polar el satélite Gravity Probe B (Sonda de Gravedad B; véase la imagen de la pág. 149), un vehículo desarrollado por la NASA en colaboración con la Universidad de Stanford, sucesor del Gravity Probe A, lanzado el 18 de junio de 1976 y que había demostrado otro de los aspectos claves de la teoría de Einstein: que el tiempo transcurre más lentamente en la superficie terrestre que lejos de ella.

El Gravity Probe B era un satélite bastante simple, integrado por un telescopio orientado a una estrella guía (IM Pegasi) y conectado a un sistema de giroscopios de una precisión extraordinaria (50 millones de veces superior a la de los giroscopios de navegación), cuyos cambios de orientación eran monitorizados por un conjunto de instrumentos denominados SQUID (siglas de Dispositivos Superconductores de Interferencia Cuántica). Los cambios de orientación en los giroscopios, en el caso de darse, iban a constituir una medida directa de los efectos geodésico y de arrastre de marco explicados en la teoría general de la relatividad de Einstein.

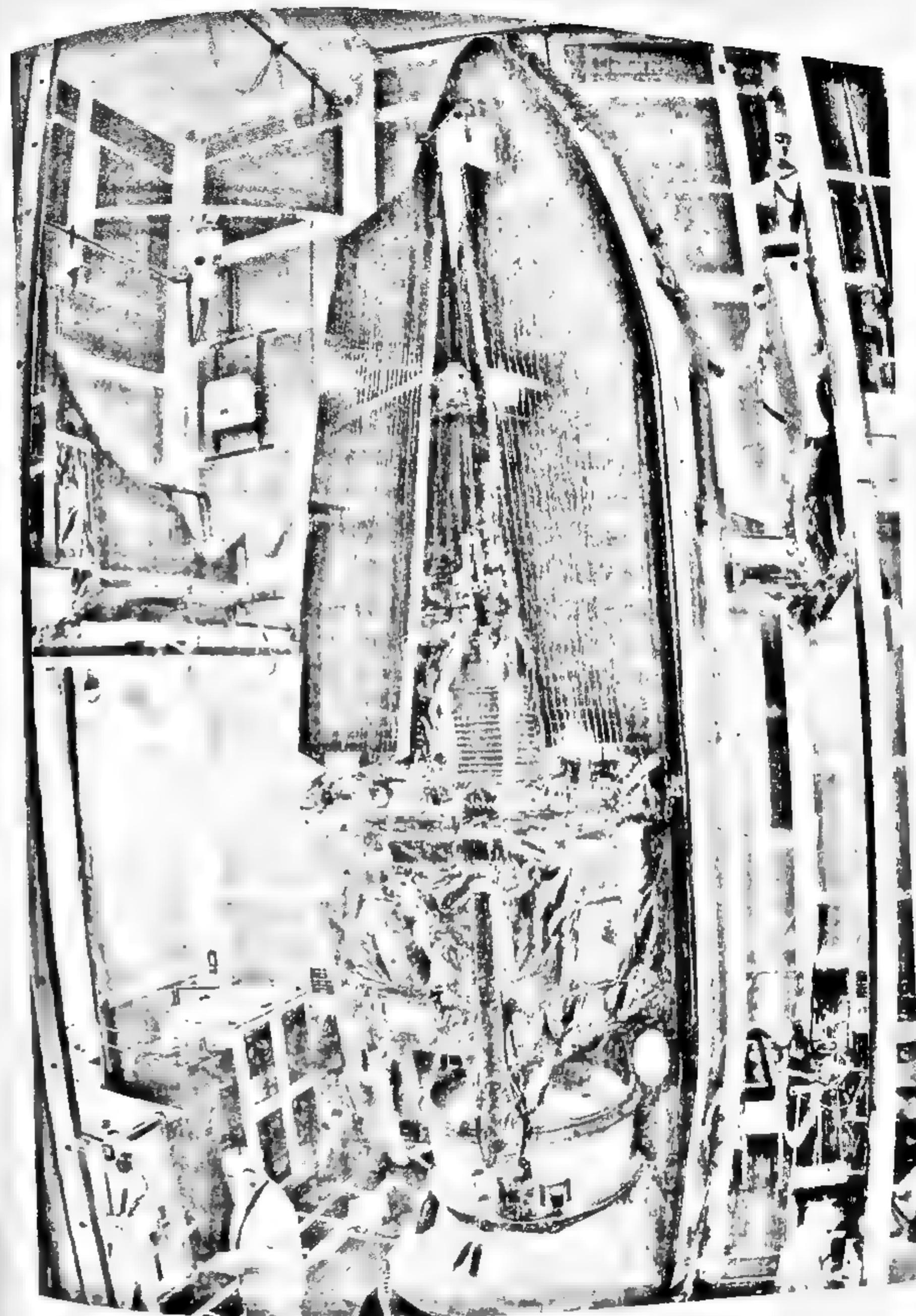
La misión del Gravity Probe B finalizó el 8 de diciembre de 2010, y sus resultados fueron hechos públicos por la NASA el 4 de mayo del año siguiente. En su órbita polar a 640 km sobre la Tierra, el satélite pudo determinar con éxito la existencia de ambos efectos predichos por Einstein. Con relación al primero (efecto geodésico), este se traduce en una variación anual de 6,6 segundos de arco en el plano de la órbita de la Tierra, o lo que es lo mismo, en la dirección norte-sur. En lo que respecta al segundo de ellos (arrastre de marco), producido por la rotación terrestre, la variación anual pudo calcularse en aproximadamente 39 milisegundos de arco, perpendicular al plano orbital, es decir, en la dirección este-oeste.

LOS MISTERIOS DEL MAGNETISMO

Como se dijo al comienzo de este capítulo, el movimiento del núcleo terrestre es el responsable de generar un campo magnético en torno a nuestro planeta. Conocido como magnetosfera, nos protege del continuo bombardeo de partículas cósmicas y solares, las cuales serían letales para la vida en la Tierra si el planeta se encontrara directamente expuesto a ellas. La lluvia de partículas procedentes del Sol (*viento solar*) comprime la magnetosfera en la parte que se encuentra enfrentada a él, produciendo el efecto contrario en la parte opuesta.

Para conocer las características de la magnetosfera con mayor detalle, además de realizar estudios de la Tierra en otros ámbitos, la Unión Soviética inició el programa Intercosmos, que, como abordamos en el capítulo 5, estaba destinado a facilitar el acceso al espacio de países afines al Bloque Comunista. Así, el 14 de octubre de 1969 fue lanzado desde el cosmódromo de Kapustin Yar el Intercosmos 1, el cual portaba instrumentación científica para obtener datos más precisos sobre el campo magnético terrestre. Sus datos fueron complementados con los obtenidos en el transcurso de otro programa científico soviético, denominado Prognoz, desarrollado entre los años 1972 y 1996 e integrado por satélites emplazados en órbitas muy elípticas.

En 1979 se inició un programa internacional de estudio de la magnetosfera, en el que la Unión Soviética participó con la misión Intercosmos 19, lanzada el 27 de febrero. Por su parte, la NASA, que tomó también parte en el referido programa, lanzó el Explorer 61 el 30 de octubre de 1979. Rebautizado con el nombre de Magsat, el satélite tenía la misión de elaborar un mapa magnético de la Tierra a partir de los datos obtenidos por dos magnetómetros. Aunque sus operaciones cesaron el 11 de junio del año siguiente, logró recopilar un volumen de datos muy importante, los cuales siguen siendo analizados a día de hoy. Dichos datos permitieron a los científicos elaborar un mapa tridimensional del interior magnético de la Tierra, y advertir una paulatina disminución de la intensidad de la magnetosfera terrestre, lo cual puede implicar una inversión de la polaridad del campo magnético en



La sonda Gravity Probe B durante su integración en el cohete lanzador.

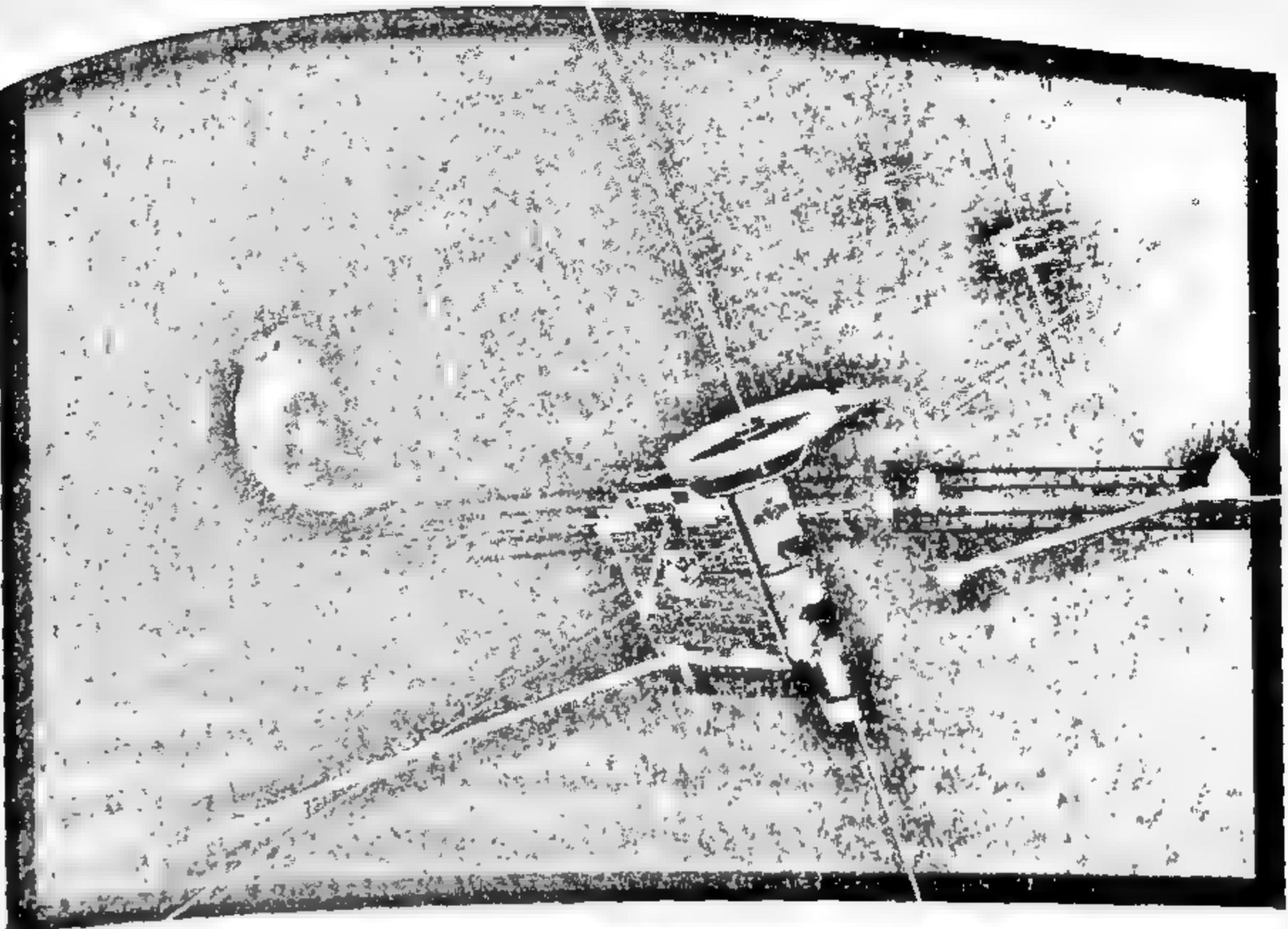
los próximos 1200 años. Además, el satélite pudo adquirir información sobre la composición y estructura geológica de la Tierra, así como sobre su temperatura.

En el campo magnético de la Tierra tienen lugar fenómenos a los que los científicos han denominado *subtormentas*, generadas por la liberación de energía de la magnetosfera. Con el propósito de estudiarlas, la NASA puso en marcha la misión Themis (en honor al titán del mismo nombre) el 17 de febrero de 2007 (véase la imagen superior de la página contigua). Integrada originalmente por cinco satélites (dos de los cuales se encuentran ahora en una órbita cercana a la Luna, rebautizados con el nombre de Artemis), los Themis están dotados de varios instrumentos, entre ellos magnetómetros y analizadores electrostáticos, a partir de los cuales pudieron determinar el proceso que desencadena estas subtormentas, denominado *reconexión magnética*, una realineación de las líneas de campo magnético que genera explosiones de energía.

El 22 de noviembre de 2013 se lanzaron desde el cosmódromo de Plesetsk tres satélites pertenecientes al programa Swarm («enjambre», en inglés) de la ESA. Con una vida útil prevista de cuatro años y equipados con magnetómetros, acelerómetros, receptores GPS, retroreflectores y sensores de campo de tecnología tanto europea como canadiense, la misión tiene el objetivo de profundizar en el conocimiento de la relación entre el campo magnético y el movimiento del núcleo externo de la Tierra, medir con gran precisión las características de la magnetosfera y determinar el ritmo al que esta se debilita.

Cinturones de radiación

A partir de su instrumento Geiger-Müller, entre febrero y mayo de 1958 el satélite estadounidense Explorer 1 pudo detectar la presencia de un cinturón de radiación intensa en torno a la Tierra. El lanzamiento fallido del Pioneer 3 el 6 de diciembre de 1958 dio como resultado el descubrimiento de un segundo cinturón. Ambos fueron bautizados con el nombre de cinturones de Van Allen en honor al científico que predijo su existencia, James



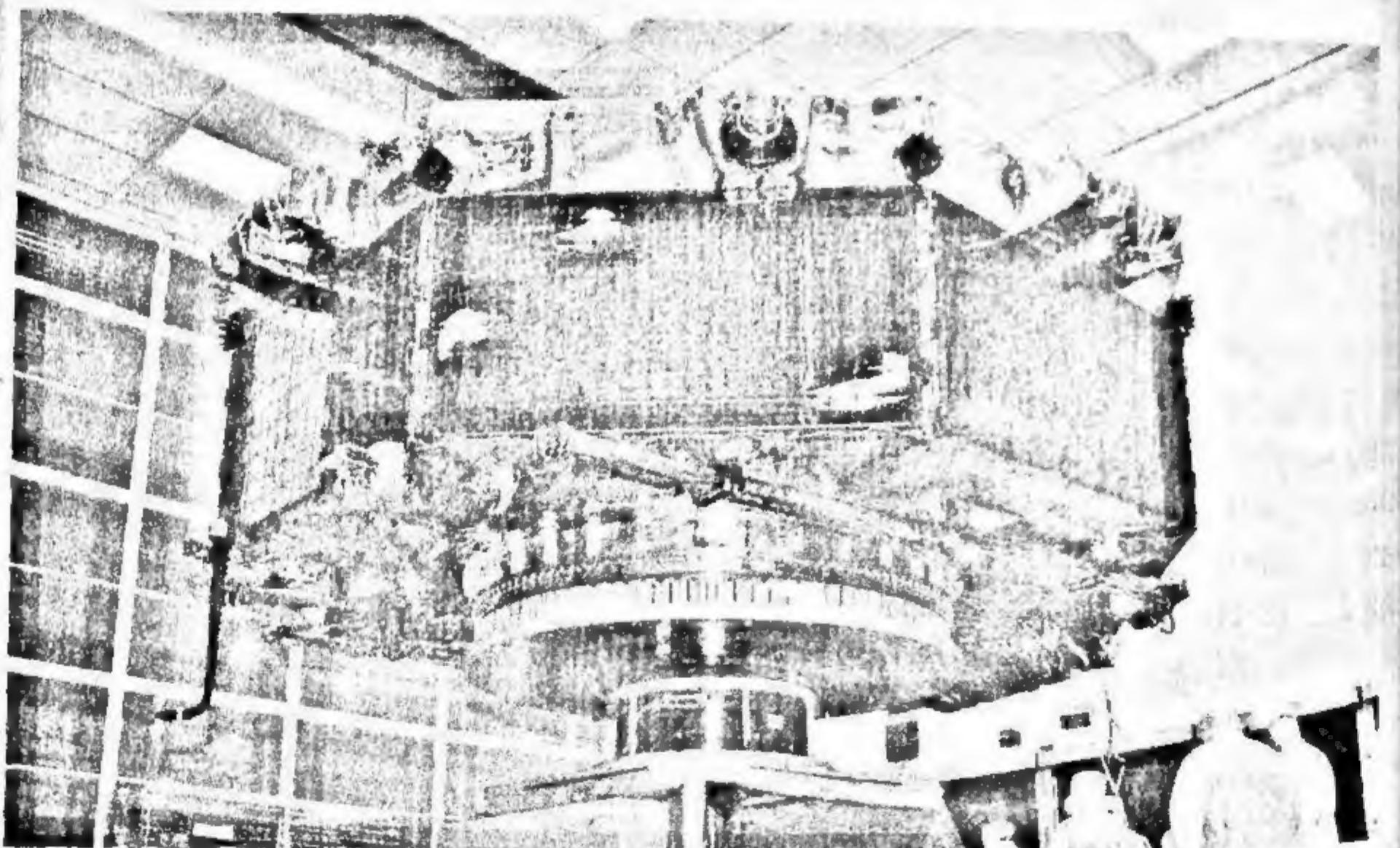
Arriba, recreación artística de los satélites de la constelación Themis. La ilustración de la izquierda refleja la órbita mantenida por los satélites de la constelación Swarm.

LA RECONEXIÓN MAGNÉTICA

La reconexión magnética es un fenómeno muy poco conocido, que tiene lugar cuando las líneas de campo magnético se realinean, generando una colossal explosión de energía. Se trata de un proceso inherente al universo y exclusivo del plasma, una mezcla de las partículas positivas y negativas que constituyen las estrellas, por lo que suele tener lugar en la atmósfera de nuestro Sol, y sus efectos pueden ser medidos en el espacio próximo a la Tierra mediante vehículos espaciales.

Una flotilla de satélites para estudiarla

Para conocer este proceso con detalle, que previamente había sido detectado por misiones como la estadounidense Themis y la europea Cluster, la NASA lanzó el 13 de marzo de 2015 una pequeña flota integrada por cuatro satélites llamados MMS (acrónimo de Multiescala Magnetosférica). Estos utilizan la magnetosfera como un laboratorio natural desde el del Sol. Dicha interacción puede dar como resultado el proceso de reconexión. Los satélites MMS orbitan en formación variable y atraviesan las regiones donde se produce la reconexión magnética en intervalos muy breves (alrededor de un segundo), motivo por el cual las naves fueron diseñadas para transmitir a la Tierra datos con una velocidad sin precedentes, cien veces más rápido que cualquier misión lanzada previamente. Su misión primaria tendría una duración de dos años.

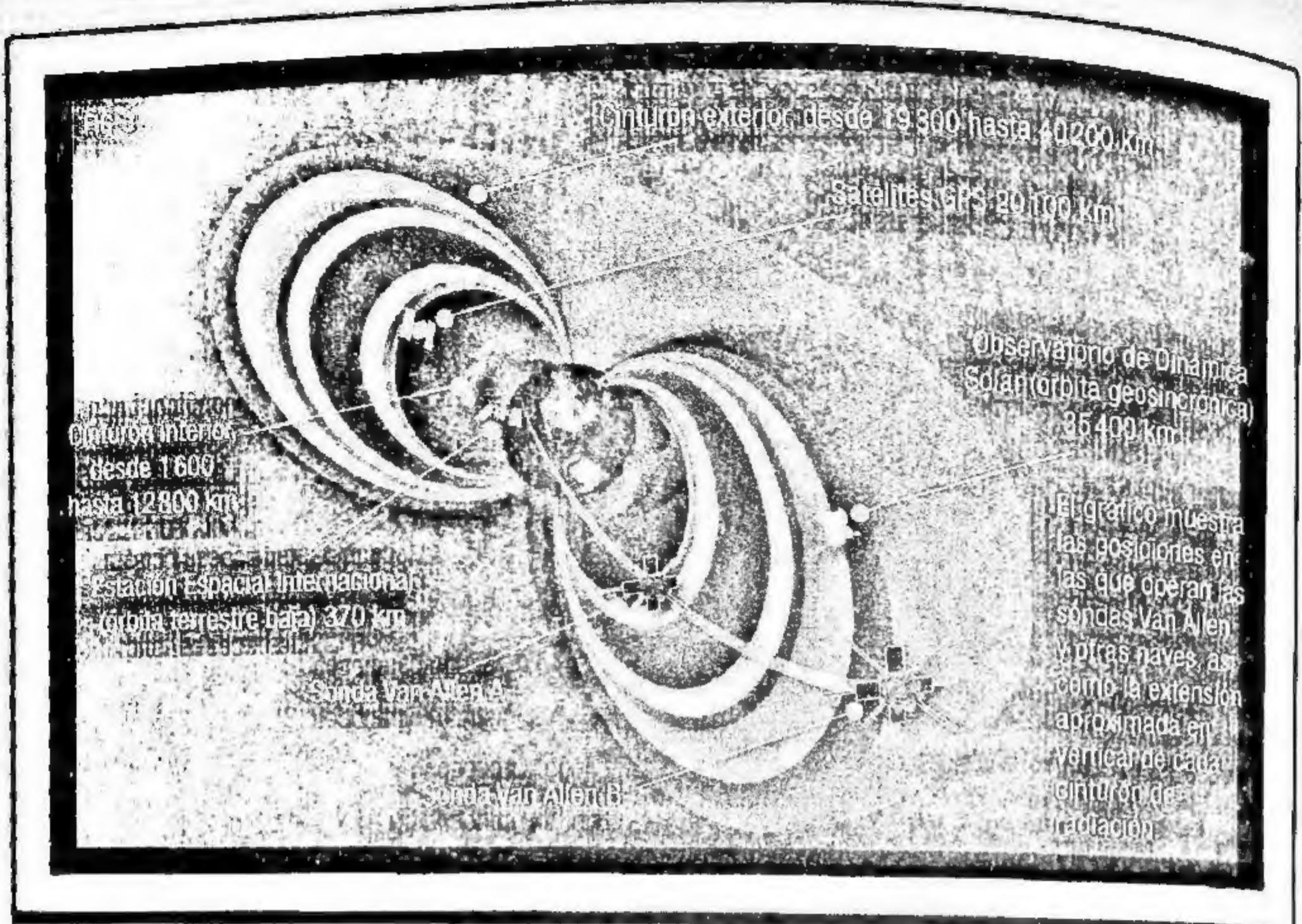


El cuarto de los satélites MMS, durante las pruebas de giro realizadas previamente a su integración en el cohete lanzador.

Van Allen. Dicho hallazgo se considera el comienzo de una nueva área en el conocimiento científico: la física magnetosférica.

Los cinturones de Van Allen se encuentran localizados en la parte interna de la magnetosfera, y están constituidos por dos anillos toroidales dispuestos de manera concéntrica, los cuales contienen partículas de alta energía que giran, rebotan y se desplazan a lo largo y ancho de ellos, unas veces descendiendo hacia la atmósfera terrestre y otras escapando al espacio exterior. Los cinturones se expanden y se contraen de manera continua, en función de la actividad que se registre en el Sol.

Dado que estos cinturones de radiación han sido poco explorados, el 30 de agosto de 2012 la NASA lanzó dos sondas denominadas RBSP (acrónimo de Sondas para el estudio de las Tormentas en los Cinturones de Radiación), más tarde rebautizadas como Sondas Van Allen en honor al referido científico. Viajando entre estos cinturones a velocidades superiores a los 3000 km/h, las sondas fueron diseñadas para soportar un continuo bombardeo de partículas y radiación mientras obtienen información sobre esta turbulenta región del espacio próximo a la Tierra. La figura 3 muestra las órbitas de estas dos sondas y, como referencia, las de algunas otras naves, así como las posiciones aproximadas de los cinturones de radiación. Entre otros estudios, la misión pretende descubrir los procesos que aceleran y transportan las partículas a lo largo de los cinturones y en qué condiciones lo hacen, así como comprender y cuantificar la pérdida de electrones experimentada por estos cinturones. Los satélites, además, contribuirán a una mejor comprensión de los cambios experimentados por los cinturones durante las tormentas geomagnéticas. Dos de los hallazgos más destacados realizados hasta la fecha por los satélites han sido la detección, en febrero de 2013, de un tercer cinturón de radiación, de carácter temporal, que permaneció activo durante algunas semanas, y el descubrimiento en 2014 de una barrera casi impenetrable que evita que los electrones más energéticos alcancen nuestro planeta. Debido a que los cinturones se contraen y se dilatan en función de la actividad solar, exponiendo en ocasiones a satélites y a otros vehículos como la Estación Espacial Internacional a la radiación, estos descubrimientos sirven para pronosticar



car aquellos cambios que afectan a tales artefactos, permitiendo realizar cambios en sus respectivas órbitas y evitando una exposición tan directa a las partículas cósmicas y solares. Estos estudios serán complementados por los realizados por la nave japonesa Arase (término nipón utilizado para definir a un río turbulento de aguas blancas embravecidas), lanzada el 20 de diciembre de 2016 desde el Centro Espacial de Uchinoura y que, del mismo modo, se internará en los cinturones de Van Allen.

En esencia, pues, las observaciones de nuestro planeta desde el espacio nos han permitido saber que tanto la tierra como el océano y la atmósfera se encuentran intrínsecamente relacionados, y que nuestro mundo es un sistema tan complejo como dinámico. El análisis e interpretación de los datos obtenidos han sido y siguen siendo vitales para comprender los diferentes procesos dinámicos que lo regulan, muchos de los cuales son críticos para la supervivencia de todas las formas de vida que pueblan la Tierra, incluida la especie humana.

- CHUVIECO, E., *Teledetección ambiental*, Barcelona, Ariel, 2010.
- CLAROS, V. y LEÓN, R., *Historia de la estación de seguimiento de satélites de Villafranca del Castillo «VILSPA» (1975-2009)*, Madrid, INTA/INSA, 2011.
- JASTROW, R., *La exploración del espacio*, Barcelona, RBA, 1993.
- PARRY, D., *Objetivo: la Luna*, Barcelona, Planeta, 2009.
- PÉREZ, C. y MUÑOZ, A., *Teledetección: nociones y aplicaciones*. Ávila, editado por los autores, 2006.
- SAGAN, C., *Cosmos*, Barcelona, Planeta, 2004.
- SPARROW, G., *Astronáutica. La historia desde el Sputnik al Transbordador y más allá*, Madrid, Ediciones Akal, 2008.
- W.A.A., *El gran libro de la astronáutica*, Barcelona, Ediciones HYMSA, 1987.
- W.A.A., *Gran atlas del espacio*, Barcelona, S.A. Ebrisa, 1988.
- W.A.A., *La técnica y la industria aeroespacial española*, Madrid, Fundación Enaire, 2012.
- WATSON, F. y OTROS, *Astronómica*, Barcelona, H.F. Ullmann Publishing, 2012.

ADEOS II / Midori II, satélite 64, 66, 68
 agricultura 11, 99, 104, 105, 112
 agua, ciclo del 75, 107, 108, 110
 ALI (Captador Avanzado de Imágenes del Terreno) 128
 AMSR-E (Radiómetro Avanzado de Barrido de Microondas) 110
 Angkor Wat 87
 ANNA 1B 140-142
 Año Geofísico Internacional 18, 20, 41
 Aqua, satélite 56, 57, 64, 68, 75, 110
 Aquarius, satélite 72, 110
 Arago, François 33
 Armero, desastre de 125
 arrastre de marco 146, 147
 Arrhenius, Svante 97
 ATS (Satélites de Aplicaciones Tecnológicas) 122
 AVHRR (Radiómetro Avanzado de Muy Alta Resolución) 46, 100, 102
 BeiDou, sistema de posicionamiento 139
 BUV (Retrodispersión del Ultravioleta) 64, 65
 CFC (clorofluorocarbonos) 62
 Challenger, transbordador 56, 86
 CNES (Centro Nacional de Estudios Espaciales) 42, 66, 68, 70, 93, 109, 110
 Columbia, transbordador 86, 142
 CONAE (Comisión Nacional de Actividades Espaciales) 72, 110
 Copernicus, programa espacial 93
 cíosfera 74, 75, 108
 Cryosat, satélite 68, 75
 CSA (Agencia Espacial Canadiense) 68, 126
 CYGNSS (Sistema Global de Satélites de Navegación para los Ciclones) 123
 Discovery, transbordador 66, 67
 Doppler
 efecto 138, 141
 radar 140
 ECMWF (Centro Europeo de Predicción Meteorológica a Medio Plazo) 34
 Egmont, Parque Nacional de 89, 91
 Einstein, Albert 146, 147
 Elektro-L, satélite 40, 42
 Endeavour, transbordador 86, 87
 Envisat, satélite 64-66, 68, 71, 74, 75, 106
 EO, serie de satélites 124, 128

equilibrio energético de la Tierra 55-57, 59, 60, 62
ERBE (Experimento para la Medida del Equilibrio Energético de la Tierra) 56-58
ERBS (Satélite para la Medida del Equilibrio Energético de la Tierra) 56, 57
ERS (Satélites de Teledetección de la Tierra) 64, 117
ESA (Agencia Espacial Europea) 42, 43, 66, 68, 74, 75, 93, 117, 126, 143, 150
Espacio y las Grandes Catástrofes, El (Carta Internacional) 129
ESSA (Administración de Servicios Científicos Medioambientales) 34-36
ETM (Cartógrafo Temático Mejorado) 81, 85, 127
EUMETSAT (Organización Europea para la Explotación de Satélites Meteorológicos) 43-46, 68, 70, 93, 109
Explorer, serie de satélites 19, 41, 55, 57, 140, 145, 148, 150

Fengyun, serie de satélites 48, 50, 57, 59
FBONTEX (sistema de vigilancia de fronteras) 93
Fujita, escala mejorada de 121, 122

GCOM-W, satélite 57, 109
Geiger-Müller, instrumento 150
geodesia 137, 140, 142
geodésico, efecto 146, 147
GeoEye 87, 88
geoide 139, 142, 144-146
GEOS (Satélite Experimental Oceánico y Geodinámico) 140
GNSS (Sistemas Globales de Navegación por Satélite) 46, 138, 139
GOCE (Explorador del Campo Gravitatorio y Circulación Oceánica), satélite 68, 143-146
GOES (Satélites Medioambientales Operativos Geoestacionarios) 33, 36, 38, 39, 49
GPM (Medición de la Precipitación Global), satélites 108-110
GRACE (Experimento Climático y de Recuperación Gravitatoria), satélite 143, 145

Gravity Probe, serie de satélites 147, 149
Himawari, satélite 47, 48

ICESat, satélite 76
IKONOS, satélite 87, 88
InSAR (Radar de Apertura Sintética Interferométrica) 117, 118
Interkosmos, programa espacial 99, 148
invernadero, efecto 10, 11, 54, 66, 58-61, 66
ISRO (Organización India de Investigación Espacial) 68, 109, 110
ITOS (Sistema Operativo Mejorado TIROS), serie de satélites 35, 36

Jason, serie de satélites 68, 70
JPL (Laboratorio de Propulsión a Chorro) 68, 70, 86, 87, 117, 118

KH-11 (Key Hole), satélite 25

LAGEOS (Satélites Geodinámicos Láser) 140, 142
Landsat, serie de satélites 80, 81, 85, 89-91, 99, 103, 104, 112, 121, 122, 127, 128

magnetosfera 136, 148, 150, 152, 153
Magsat, satélite 148
Megha-Tropiques, satélite 57, 109
Meteor, serie de satélites 40, 42, 57, 64, 66
Meteosat (primera generación), serie de satélites 33, 42-45, 59
MetOp, serie de satélites 46, 47, 64, 100, 102, 109
MMS (Multiescala Magnetosférica), satélites 152
MODIS (Espectro-radiómetro Generador de Imágenes de Resolución Moderada) 91, 126
MSG (Segunda Generación de satélites Meteosat) 43-45, 57

NASA (Administración Nacional de Aeronáutica y del Espacio) 20, 28, 34, 40, 56, 65, 66, 68, 70, 72, 74, 75, 80, 86, 87, 89, 94, 108-110, 117, 118, 122-124, 126, 128, 140, 143, 147, 148, 150, 152, 153

NAVIC (sistema de posicionamiento) 130
NAVSTAR-GPS, sistema de satélites 130
NCEP (Centros Nacionales de Predicción Medioambiental de Estados Unidos) 34
NDVI (Índice Normalizado de Diferencia de Vegetación) 100, 101
Nimbus, serie de satélites 56, 57, 63-65
Niña, La (fenómeno climático) 70
Niño, El (fenómeno climático) 70
NOAA (Administración Nacional Atmosférica y Oceánica) 33, 34, 36, 41, 49, 68, 70, 109, 110
NOAA, serie de satélites 35, 56, 57, 64, 100, 102, 109, 110
NWP (Predicción Meteorológica Numérica) 33, 34, 47

Oceansat, serie de satélites 68
OLI (Cartografía Operativa de Terreno) 103, 122
ozono 10, 40, 41, 46, 50, 62-66, 94

Parasol, satélite 57
Prestige, catástrofe del 132
protosolar, nebulosa 135

Quickbird, satélite 87
QZSS, sistema de posicionamiento 139

RADARSAT, serie de satélites 68, 126
radiómetro 32, 35, 42, 45, 46, 49, 50, 55, 57, 64, 65, 71, 100, 102, 110, 126
reconexión magnética 150, 152
relatividad general, teoría de la 146, 147

Saffir-Simpson, escala de 49, 122
salinidad de los océanos 72, 74, 75
Santa Elena, Monte 125
SAR (Radar de Apertura Sintética) 86, 87, 106, 117, 118, 138
SBUV (Instrumento de Medición de la Retrodispersión Ultravioleta Solar) 64, 65
SECOR (instrumento para la Comparación Secuencial de la Distancia) 140
Sentinel, serie de satélites 68, 93, 117, 126

SIR-C (Radar de Cartografía del Transbordador) 86, 87
SMOS (Humedad del Suelo y Salinidad de los Océanos), satélite 68, 72, 73, 75
SPOT, serie de satélites 112
Sputnik, satélite 7, 9, 19, 21, 34, 140
SQUID (Dispositivos Superconductores de Interferencia Cuántica) 147
SRL (Laboratorio Radar Espacial) 86, 87
SRTM (Misión de Topografía Radar del Transbordador) 87, 88
Suomi NPP, satélite 57, 64, 68, 82, 109
Swarm, satélite 150, 151

TanDEM-X, satélite 68
Terra, satélite 56, 57, 68, 74, 91, 94, 118, 120, 126
TerraSAR-X, satélite 68
terremoto 9, 113, 116-118, 120, 121, 123, 143, 145
Themis, serie de satélites 150-152
Thomson, William 97
TIROS, serie de satélites 34-37, 40, 41
TM (Cartógrafo Temático) 81, 85, 121
TOMS (Espectrómetro para la Cartografía Total del Ozono) 40, 64, 65
TOPEX/Poseidon, satélite 66, 68, 70
tornado 121, 122
Transit, serie de satélites 139, 140
TRMM, satélite 56, 57, 108-110
tsunami 9, 113, 117-119, 121, 149

UARS (Satélite para la Investigación de la Atmósfera Superior) 64, 66, 67
Ubar, ciudad perdida de 96
USGS (Servicio de Reconocimiento Geológico de Estados Unidos) 80

V2, cohete 15-18, 20, 31
Van Allen, James Alfred 19, 20, 25, 150, 153
cinturones de 19, 20, 150, 153, 154
sondas 153, 154

Wexler, Harry 31, 41
Wilkes, Tierra de 143

Zhouqu, condado de 128